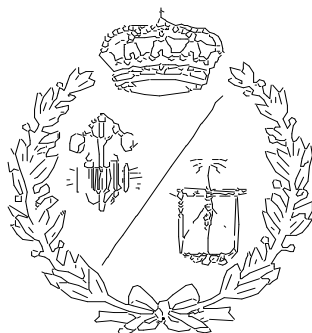


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado
Simulación, estudio y optimización de un
transformador trifásico de 4000 VA.
Simulation, study and optimization of a 4000 VA
three-phase transformer.

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Autor: Adrián de la Rasilla Calabuig

Directores: Alberto Arroyo Gutiérrez y María Ángeles Cavia Soto

Septiembre 2019

Contenido

1	Agradecimientos	10
2	Glosario	11
3	Resumen	12
4	Introducción	14
5	Objetivos del TFG	19
6	Descripción Teórica	20
6.1	Campos eléctrico y magnético	20
6.2	Inducción Electromagnética	22
6.3	Materiales Magnéticos.	22
6.3.1	Materiales Diamagnéticos.	23
6.3.2	Materiales Paramagnéticos.	23
6.3.3	Materiales Ferromagnéticos.	23
6.4	Máquinas Eléctricas.	24
6.4.1	Generador:	24
6.4.2	Motor:	24
6.4.3	Transformador:	24
6.5	Elementos de las máquinas eléctricas.	24
6.6	El transformador.	27
6.6.1	Funcionamiento.	27
6.7	Pérdidas.	29
6.7.1	Pérdidas en el cobre:	29
6.7.2	Pérdidas en el hierro:	30
6.7.3	Pérdidas mecánicas:	31
6.8	Tipología de Ensayos	32
6.8.1	Vacío	32
6.8.2	Cortocircuito.	33
6.8.3	Carga.	33
7	Bancada de ensayos	34
7.1	Estudio Eléctrico	35
7.1.1	Ensayo de Vacío.	42
7.1.2	Ensayo de Cortocircuito.	47
7.1.3	Ensayo de Carga.	54

7.2	Ensayo Térmico.....	61
7.2.1	Vacío.....	61
7.2.2	Cortocircuito.	64
7.2.3	Carga.	65
8	Caracterización y Simulación.	68
8.1	Maxwell 2D. Ensayo Eléctrico.	69
8.1.1	Geometría.	69
8.1.2	Mallado.	72
8.1.3	Materiales.	73
8.1.4	Ensayo de Vacío.	78
8.1.5	Ensayo de Cortocircuito.	86
8.1.6	Ensayo de Carga.	92
8.2	Transient Thermal. Ensayo Térmico.	98
8.2.1	Importación de datos de la prueba eléctrica.	98
8.2.2	Ensayo de Vacío.	101
8.2.3	Ensayo de Cortocircuito.	103
8.2.4	Ensayo de Carga.	105
9	Validación del modelo.	108
9.1	Estudio Eléctrico.....	108
9.2	Estudio Térmico.	109
10	Metodología de Optimización.	111
11	Aplicación de la metodología.....	113
12	Conclusiones.	119
13	Anexo cálculo de espiras del transformador.	121
14	Anexo cálculo de las pérdidas reales de cortocircuito.....	124
15	Bibliografía	125

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Resultados de tensiones y corrientes para la bancada en Vacío. (Elaboración propia). [22]</i>	45
<i>Tabla 2. Resultados de tensiones y corrientes para la bancada en Cortocircuito. (Elaboración propia). [22]</i>	52
<i>Tabla 3. Tabla de Resistencias de carga. (Elaboración propia). [23]</i>	55
<i>Tabla 4. Resultados de tensiones y corrientes para la bancada en Carga. (Elaboración propia). [22]</i>	58
<i>Tabla 5. Tabla de temperaturas iniciales para el ensayo de Vacío. (Elaboración propia). [23]</i>	63
<i>Tabla 6. Tabla de temperaturas finales para el ensayo de Vacío. (Elaboración propia). [23]</i>	63
<i>Tabla 7. Tabla de temperaturas finales para el ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [23]</i>	64
<i>Tabla 8. Tabla de temperaturas finales para el ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [23]</i>	64
<i>Tabla 9. Tabla de temperaturas finales para el ensayo de Carga. (Elaboración propia). [23]</i>	66
<i>Tabla 10. Tabla de temperaturas finales para el ensayo de Carga. (Elaboración propia). [23]</i>	66
<i>Tabla 11. Resultados de tensiones y corrientes para la simulación en Vacío. (Elaboración propia). [22]</i>	83
<i>Tabla 12. Resultados de tensiones y corrientes para la simulación en Cortocircuito. (Elaboración propia). [22]</i>	90
<i>Tabla 13. Resultados de tensiones y corrientes para la simulación en Carga. (Elaboración propia). [22]</i>	95
<i>Tabla 14. Valores de las variables de control. (Elaboración propia). [23]</i>	113
<i>Tabla 15. Valores del modelo inicial. (Elaboración propia). [23]</i>	114
<i>Tabla 16. Valores del modelo optimizado. (Elaboración propia). [23]</i>	117

Índice de Figuras

Figura 1	Constitución de Red Eléctrica en 1985. (Web de Red Eléctrica de España). [3]	15
Figura 2	CECOEL y CECRE. (Web de Red Eléctrica de España). [3]	16
Figura 3	Sistema de suministro eléctrico. (Wikipedia) [5]	18
Figura 4	Estator de un motor eléctrico. [11]	25
Figura 5	Rotor de un motor eléctrico. [12]	25
Figura 6	Circuito real del transformador. [13]	28
Figura 7	Fenómeno de histéresis. [16]	30
Figura 8	Circuito eléctrico para un ensayo de vacío en un transformador monofásico. [19]	32
Figura 9	Circuito eléctrico para un ensayo de cortocircuito en un transformador monofásico. [19]	33
Figura 10	Placa de características del transformador. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).	36
Figura 11	Lado de baja tensión del transformador. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).	36
Figura 12	1ª Imagen de la bancada de ensayos. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).	37
Figura 13	Fuente de tensión de alterna vista de frente. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).	38
Figura 14	Fuente de tensión de alterna vista por detrás. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).	39
Figura 15	Medidor digital de potencia. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).	40
Figura 16	Raspberry Pi. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).	40
Figura 17	Fuente de tensión de continua. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).	41
Figura 18	Representación valores ensayo de vacío. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).	43
Figura 19	Valores de la fuente para el ensayo de Vacío. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).	43
Figura 20	Conexiones para el lado de alta tensión en vacío. (Elaboración propia, fotografía tomada en la bancada de ensayos).	44
Figura 21	Conexiones para el lado de baja tensión en vacío. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).	45
Figura 22	Gráfico de tensiones para la bancada en Vacío. (Elaboración propia) [22]	46
Figura 23	Gráfico de corrientes para la bancada en Vacío. (Elaboración propia) [22]	46
Figura 24	Resultados de pérdidas de la bancada en Vacío. (Elaboración propia) [22]	47

<i>Figura 25</i>	<i>Valores de la fuente para el ensayo de Cortocircuito. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).</i>	<i>48</i>
<i>Figura 26</i>	<i>Representación valores ensayo de Cortocircuito. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).</i>	<i>49</i>
<i>Figura 27</i>	<i>Datos del “Fluke” en Cortocircuito. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).</i>	<i>49</i>
<i>Figura 28</i>	<i>Conexiones para el lado de alta tensión en Cortocircuito. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).</i>	<i>50</i>
<i>Figura 29</i>	<i>Conexiones para el lado de baja tensión en Cortocircuito. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).</i>	<i>51</i>
<i>Figura 30</i>	<i>Gráfico de tensiones para la bancada en Cortocircuito. (Elaboración propia) [22]</i>	<i>52</i>
<i>Figura 31</i>	<i>Gráfico de corrientes para la bancada en Cortocircuito. (Elaboración propia) [22]</i>	<i>53</i>
<i>Figura 32</i>	<i>Resultados de pérdidas de la bancada en Cortocircuito. (Elaboración propia) [22]</i>	<i>53</i>
<i>Figura 33</i>	<i>2ª Imagen de la bancada de ensayos para Cortocircuito. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).</i>	<i>54</i>
<i>Figura 34</i>	<i>Carga trifásica. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).</i>	<i>55</i>
<i>Figura 35</i>	<i>Conexiones para el lado de alta tensión en Carga. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).</i>	<i>56</i>
<i>Figura 36</i>	<i>Conexiones para el lado de baja tensión en Carga. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).</i>	<i>57</i>
<i>Figura 37</i>	<i>Valores de la fuente para el ensayo de Carga. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).</i>	<i>57</i>
<i>Figura 38</i>	<i>Valores del “Fluke” en Carga. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).</i>	<i>58</i>
<i>Figura 39</i>	<i>Gráfico de tensiones para la bancada en Carga. (Elaboración propia) [22]</i>	<i>59</i>
<i>Figura 40</i>	<i>Gráfico de corrientes para la bancada en Carga. (Elaboración propia) [22]</i>	<i>59</i>
<i>Figura 41</i>	<i>Resultados de pérdidas de la bancada en Carga. (Elaboración propia) [22]</i>	<i>60</i>
<i>Figura 42</i>	<i>3ª Imagen de la bancada para el ensayo de Carga. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).</i>	<i>60</i>
<i>Figura 43</i>	<i>Vista de perfil de la colocación de las sondas PT100. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).</i>	<i>62</i>
<i>Figura 44</i>	<i>Gráfico de temperaturas para el ensayo de Vacío. (Elaboración propia) [22]</i>	<i>63</i>
<i>Figura 45</i>	<i>Gráfico de temperaturas para el ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [22]</i>	<i>65</i>
<i>Figura 46</i>	<i>Termómetro digital. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).</i>	<i>65</i>
<i>Figura 47</i>	<i>Gráfico de temperaturas para el ensayo de Carga. (Elaboración propia). [22]</i>	<i>67</i>
<i>Figura 48</i>	<i>Solution Type. (Elaboración propia). [25]</i>	<i>69</i>

Figura 49	Estructura del mallado para el estudio eléctrico. (Elaboración propia mediante el software Maxwell 2D). [25]	72
Figura 50	Tabla de Características del material. (Elaboración propia). [25]	73
Figura 51	Tabla de propiedades del material. (Elaboración propia). [25]	74
Figura 52	Curva de pérdidas en el hierro para una frecuencia de 50 Hz. (Elaboración propia). [25]	75
Figura 53	Geometría del transformador. (Elaboración propia). [25]	76
Figura 54	Excitations, Estructura de los devanados. (Elaboración propia). [25]	77
Figura 55	Banco de trabajo en ANSYS. (Elaboración propia). [25]	78
Figura 56	Circuito de conexiones para el ensayo de Vacío. (Elaboración propia mediante el programa Ansys). [25]	79
Figura 57	Solve Setup 1. General. (Elaboración propia mediante el programa Ansys). [25]	80
Figura 58	Solve Setup 2. Solver. (Elaboración propia). [25]	81
Figura 59	Solution Data, ensayo de Vacío. (Elaboración propia). [25]	82
Figura 60	Saturación del campo magnético en el ensayo de Vacío. (Elaboración propia). [25]	83
Figura 61	Gráfico de tensiones para la simulación en Vacío. (Elaboración propia). [22]	84
Figura 62	Gráfico de corrientes para la simulación en Vacío. (Elaboración propia). [22]	84
Figura 63	Resultados de pérdidas de la simulación de Vacío. (Elaboración propia). [22]	85
Figura 64	Banco de trabajo en el ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [25]	86
Figura 65	Circuito de conexiones para el ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [25]	87
Figura 66	Solutions, Ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [25]	88
Figura 67	Saturación magnética en el ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [25]	89
Figura 68	Gráfico de tensiones para la simulación en Cortocircuito. (Elaboración propia). [22]	90
Figura 69	Gráfico de corrientes para la simulación en Cortocircuito. (Elaboración propia). [22]	91
Figura 70	Resultados de pérdidas de la simulación de Cortocircuito. (Elaboración propia). [22]	91
Figura 71	Banco de trabajo para el ensayo de Carga. (Elaboración propia). [25]	92
Figura 72	Circuito de conexiones para el ensayo de Carga. (Elaboración propia). [25]	93
Figura 73	Solutions, ensayo de Carga. (Elaboración propia). [25]	94
Figura 74	Saturación magnética en el ensayo de Carga. (Elaboración propia). [25]	95
Figura 75	Gráfico de tensiones para la simulación en Carga. (Elaboración propia). [22]	96
Figura 76	Gráfico de corrientes para la simulación en Carga. (Elaboración propia). [22]	96
Figura 77	Resultados de pérdidas de la simulación de Carga. (Elaboración propia). [22]	97
Figura 78	Importación de datos eléctricos al software térmico. (Elaboración propia). [21]	98
Figura 79	Interfaz ensayo Térmico. (Elaboración propia). [26]	99
Figura 80	Convection. Ensayo Vacío. (Elaboración propia). [26]	100

Figura 81	Imported heat generation en el ensayo de Vacío. (Elaboración propia). [26]	101
Figura 82	Temperatura del ensayo de Vacío. (Elaboración propia). [26]	102
Figura 83	Gráfico de temperatura para el ensayo de Vacío. (Elaboración propia). [22]	102
Figura 84	Pantalla ensayo térmico del Cortocircuito. (Elaboración propia). [26]	103
Figura 85	Imported heat generation, ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [26]	104
Figura 86	Gráfico de temperatura para el ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [22]	104
Figura 87	Imported heat generation, en el núcleo en el ensayo de Carga. (Elaboración propia). [26]	105
Figura 88	Imported heat generation, en los devanados en el ensayo de Carga. (Elaboración propia). [26]	105
Figura 89	Temperature, ensayo de Carga. (Elaboración propia). [26]	106
Figura 90	Gráfico de temperatura para el ensayo de Carga. (Elaboración propia). [22]	107
Figura 91	Comparativa de pérdidas para el ensayo de vacío. (Elaboración propia). [22]	108
Figura 92	Comparativa de pérdidas para el ensayo de cortocircuito. (Elaboración propia). [22]	109
Figura 93	Comparación de temperaturas máximas de vacío en la simulación y bancada. (Elaboración propia). [22]	110
Figura 94	Comparación de temperaturas máximas de cortocircuito en la simulación y bancada. (Elaboración propia). [22]	110
Figura 95	Saturación magnética para la variación de espesor. (Elaboración propia). [22]	115
Figura 96	Puntos de trabajo para los diferentes espesores. (Elaboración propia). [25]	115
Figura 97	Temperatura máxima para la variación de espesor. (Elaboración propia). [22]	116
Figura 98	Pérdidas en el núcleo para la variación de espesor. (Elaboración propia). [22]	117
Figura 99	Disminución del peso para el núcleo magnético. (Elaboración propia). [22]	118
Figura 100	Arrollamiento del devanado ficticio. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).	121
Figura 101	Elementos para el cálculo de espiras del transformador. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).	122
Figura 102	Resultados para el cálculo de espiras. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).	123

Índice de Planos

<i>Plano 1</i>	<i>Esquema de la bancada de ensayos. (Elaboración propia). [20]</i>	<i>35</i>
<i>Plano 2</i>	<i>Esquema de conexiones del transformador para el ensayo de Vacío. (Elaboración propia). [20]</i>	<i>44</i>
<i>Plano 3</i>	<i>Esquema de conexiones del transformador para el ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [20]</i>	<i>51</i>
<i>Plano 4</i>	<i>Esquema de conexiones del transformador para el ensayo de Carga. (Elaboración propia). [20]</i>	<i>56</i>
<i>Plano 5</i>	<i>Núcleo del transformador. (Elaboración propia). [27]</i>	<i>70</i>
<i>Plano 6</i>	<i>Transformador completo. (Elaboración propia). [27]</i>	<i>71</i>

Índice de Fórmulas

<i>Fórmula 1</i>	<i>Ecuación del campo eléctrico.</i>	<i>19</i>
<i>Fórmula 2</i>	<i>Ecuación del campo magnético.</i>	<i>20</i>
<i>Fórmula 3</i>	<i>Ecuación de la inducción magnética.</i>	<i>20</i>
<i>Fórmula 4</i>	<i>Ecuación de la fuerza contraelectromotriz.</i>	<i>21</i>
<i>Fórmula 5</i>	<i>Ecuación de la fuerza electromotriz.</i>	<i>21</i>
<i>Fórmula 6</i>	<i>Ecuación de la relación de transformación.</i>	<i>27</i>
<i>Fórmula 7</i>	<i>Ecuación de pérdidas en el cobre.</i>	<i>29</i>
<i>Fórmula 8</i>	<i>Ecuación de la potencia aparente en función de los valores de fase.</i>	<i>47</i>

1 Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi familia, en especial a mi madre, que siempre me ha dado fuerzas para seguir adelante cuando llega ese momento de debilidad que te hace querer abandonar las metas difíciles de alcanzar. Aunque muchas veces no me haya dado cuenta de ello, es ahora cuando más tengo que agradecértelo, al fin y al cabo, me has enseñado a terminar lo que se empieza y más cuando merece la pena.

También quiero nombrar a mi tío, que de no ser por él puede que no estuviese escribiendo estos párrafos. Estoy seguro de que la idea de estudiar una ingeniería surgió por influencia tuya.

Por último, quiero agradecer a mi tutor Alberto Arroyo Gutiérrez el haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto y terminar así mis estudios. Siempre he creído que sería uno de los mejores profesores con los que coincidiría en mi etapa como estudiante.

2 Glosario.

V: Tensión eléctrica. Es la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos. Se mide en voltios.

I: Intensidad de corriente. Cantidad de corriente por unidad de tiempo que recorre un material. Se mide en amperios.

R: Resistencia. Oposición de un material al flujo de corriente eléctrica. Se mide en ohmios.

B: Inducción magnética. Magnitud física que caracteriza al vector que representa al campo magnético. Se mide en teslas.

P: Potencia eléctrica, es la cantidad de energía generada por un elemento. Su medida es el vatio.

f: Frecuencia. Cantidad de repeticiones en un determinado tiempo de un suceso periódico. Medida en hercios.

N: Numero de espiras.

Φ : Flujo magnético. Cantidad máxima de magnetismo que atraviesa la superficie de un elemento. Se mide en weber.

B: Inducción magnética. Proceso por el que un campo magnético genera un campo eléctrico. Medido en teslas.

H: Campo magnético. Influencia magnética de las corrientes eléctricas y de los materiales magnéticos. Medido en amperios metro.

μ : Permeabilidad relativa. Relación entre la permeabilidad de un material y la del vacío.

3 Resumen

En este proyecto de fin de grado se realizará un estudio de un transformador trifásico de 4000 VA. Se analizarán las características tanto eléctricas como térmicas de la máquina para el transformador real y posteriormente se diseñará un modelo para su simulación y optimización.

El estudio al transformador real constará de dos partes, un estudio eléctrico con sus correspondientes ensayos de Vacío, Cortocircuito y Carga, y además un estudio térmico gracias a la utilización de unas sondas de temperatura. En la bancada de ensayos del laboratorio se realizarán las conexiones pertinentes y se alimentará a la máquina mediante una fuente de tensión alterna para la posterior obtención de resultados por medio de un analizador de potencia.

Estos ensayos serán realizados también mediante el uso del programa de elementos finitos ANSYS. Se obtendrán los resultados eléctricos mediante el uso del software del programa “MAXWELL 2D” para los tres casos de estudio: Vacío, Cortocircuito y Carga. Posteriormente se realizarán los ensayos térmicos utilizando el software “TRANSIENT THERMAL” para obtener una evolución de la temperatura en el tiempo de ensayo determinado. Será necesario definir previamente la geometría del transformador, aplicar una malla de elementos finitos y asignar los materiales correspondientes a la máquina. Después, ya se podrán cargar los diferentes circuitos de conexiones de la máquina para cada ensayo. Analizando los resultados obtenidos y con las correspondientes modificaciones se llegará a un modelo que cumpla las condiciones impuestas en la bancada real de ensayos.

Para finalizar, se desarrollan unas medidas de optimización mediante el uso del software del programa ANSYS, que nos ayudarán a disminuir los costes de fabricación. Se establecerán dos variables de control, la saturación magnética y la temperatura. El modelo optimizado deberá encontrarse dentro de los márgenes establecidos por estas variables.

A study of a 4000 VA three-phase transformer will be carried out in this project. Both, electrical and thermal characteristics of the machine, will be analyzed for the real transformer and then, a model of the machine will be designed for the simulation and optimization.

The characterization of the transformer will consist of two parts, No-load, Short-circuit and Load tests for the electrical study, then the thermal study with the utilization of temperature probes. The relevant connections will be done in the laboratory and the machine will be fed by an alternating voltage source. The results will be shown in a power analyzer.

These tests will also be carried out with the finite element program ANSYS. The electrical results will be obtained with the use of the software "MAXWELL 2D" for the three case of study: No-load, Short-Circuit and Load tests. The thermal test will be carried out using the software "TRANSIENT THERMAL" to obtain the variation of the temperature in the determined period of time. Previously, it will be necessary to define the geometry of the transformer, apply a finite element mesh and assign the corresponding materials to the machine. Then, the different circuits of connections of the machine can be loaded for each test. Analyzing the obtained results and with the correct modifications, a model that meets the conditions imposed in the real test will be reached.

Finally, some optimization measures will be developed through the ANSYS software, which will help to reduce manufacturing costs. Two control variables, magnetic saturation and temperature, will be established. The optimized model should be within the margins established by these variables.

4 Introducción

La introducción de este proyecto de fin de grado se centrará en el recorrido histórico que han tenido las máquinas eléctricas en nuestra industria, en especial los transformadores de potencia, que es la máquina eléctrica que va a ser tratada en este estudio.

El transporte de energía eléctrica a largas distancias ha sido una de las innovaciones más importantes que ha experimentado la industria, esto ha servido para abastecer ciudades enteras y acercar los servicios eléctricos a las personas para enriquecer sus vidas. Hoy la mayor parte de la población no podría imaginar sus vidas sin estos servicios eléctricos, como puede ser la iluminación en los hogares, la televisión, el ordenador, etc.

La Segunda Revolución Industrial vino de la mano de estos avances en máquinas eléctricas acontecidos desde finales del siglo XIX hasta comienzos del siglo XX. Surgieron en estos años grandes innovaciones en sistemas de transporte y comunicación: automóviles, aviones, radio y teléfono.

Desde entonces, los sistemas eléctricos han sufrido cambios por los que han pasado a ser imprescindibles en nuestros días. Los transformadores juegan un papel importantísimo en estos sistemas, pudiendo regular el nivel de tensión tanto para elevarlo como para reducirlo. En el transporte de energía eléctrica, a mayor tensión menor repercusión se encuentra en el coste económico a soportar. De ahí que los transformadores sean tan importantes en nuestra red eléctrica de transmisión.

En 1886 se instaló el primer sistema de distribución eléctrica con transformadores en la localidad estadounidense de Great Barrington, Massachusetts. Desde entonces la electricidad se ha convertido en un símbolo de modernidad y desarrollo de los países. [1]

Las aplicaciones de los transformadores son muy diversas. En la industria automovilística están siendo utilizados transformadores para monitorizar y controlar el voltaje necesario para cargar las baterías de los coches eléctricos e híbridos. Han sido desarrollados transformadores inteligentes o “smart transformers” que tienen la capacidad de recargar varios vehículos a la vez. También son utilizados en la industria metalúrgica para regular los niveles de tensión necesarios para las grandes fábricas, siendo necesarios transformadores de alta tensión. En la industria electroquímica, transformadores rectificadores son utilizados para realizar la electrólisis de diferentes elementos. Entre otras muchas aplicaciones, también son usados en sectores como el aeroespacial, sistemas de audio, comunicaciones o procesamiento de datos. [2]

Se va a profundizar un poco más en los sistemas eléctricos de transmisión y distribución para que se tenga un conocimiento real de lo que suponen los transformadores para llevar a cabo estos transportes de energía eléctrica.

En la **Figura 1** se puede ver el sistema de transmisión de la península ibérica en el año 1985, con las primeras líneas de transmisión que tenían una extensión de **10500 km** y fueron conformadas por compañías eléctricas españolas. Red eléctrica nació así, en 1985 presidida por Paulina Beato, siendo presidenta hasta 1988. [3]



Figura 1 Constitución de Red Eléctrica en 1985. (Web de Red Eléctrica de España). [3]

Red Eléctrica fue creciendo rápidamente y en cuestión de 5 años había incrementado sus trabajadores en 10 veces. Comenzó a enfrentarse a grandes retos, como son las comunicaciones internacionales para el transporte de energía, así como la mejora de su infraestructura dentro de la península.

Como avances importantes se desarrolló la fibra óptica y se estableció la conexión submarina entre España y Marruecos, que fue la primera red de intercambio de energía eléctrica entre continentes.

A partir del año **2000** comienza la expansión internacional y gracias a inversiones de entidades extranjeras como la empresa peruana **REDESUR** o la compañía boliviana Transportadora de Electricidad (**TDE**) se forma finalmente en el año **2001** Red Eléctrica Internacional. También es en estos años cuando las energías renovables adquieren un papel importante y se empiezan a realizar inversiones que ayuden al desarrollo de las mismas. En **2006** se crea el **CECRE**, Centro de Control de

Régimen Especial, que es el organismo desde el que se gestiona y controla la generación de todos los productores de energía eléctrica renovable instalados en nuestro país. Pertenece al **CECOEL [4]**, que es el Centro de Control Eléctrico responsable de la operación y supervisión coordinada en tiempo real de las instalaciones de generación y transporte del sistema eléctrico español.

En la **Figura 2** podemos ver el sistema de control desde el que actúa Red Eléctrica de España.



Figura 2 CECOEL y CECRE. (Web de Red Eléctrica de España). [3]

En **2008** se realiza también un importante avance en la red eléctrica, como es la conexión con nuestro país vecino Francia. Más tarde se consigue la adquisición por parte de Red Eléctrica de los activos restantes de las empresas del sector y es en **2013** cuando se establece como único operador del sistema eléctrico español.

Uno de los hitos más importantes de Red Eléctrica fue en **2015** cuando se realizó la interconexión subterránea entre España y Francia, la cual supuso un incremento de 2 veces la capacidad de transporte de energía entre países.

Una vez introducida la formación del sistema eléctrico español, el estudio se centrará en las dificultades que aparecen a la hora de poner en práctica el suministro eléctrico a través de las líneas de transmisión desde que se produce la electricidad en las centrales de generación hasta que llega a

los hogares e industrias. Además, se explicará la problemática que existe en el equilibrio entre generación y consumo.

El equilibrio entre generación y consumo es muy importante para nuestro sistema eléctrico ya que se debe mantener en todo momento un mismo nivel de tensión y frecuencia. Esto requiere de un sistema capaz de hacer frente a las variaciones constantes de demanda que se producen a lo largo del día. Se cuenta con un sistema eléctrico que se compone de centrales que ofrecen seguridad en el suministro y por otro lado, centrales de recurso renovable.

Las centrales que ofrecen seguridad en el suministro son por ejemplo las centrales térmicas de carbón o las centrales nucleares. Son las centrales que mayor aporte de energía realizan a nuestro sistema y es debido a sus horas de utilización a lo largo día. Tiene inercia térmica y en el caso de las centrales nucleares su puesta en marcha es complicada, por ello suelen trabajar como centrales de base sin paradas durante periodos de 12 a 24 meses.

También están las centrales hidroeléctricas, que podemos englobar en centrales base, aunque también se utilizan para otras circunstancias cuando la disponibilidad del recurso renovable lo permite; como ejemplo se pueden utilizar como centrales de punta cuando el caudal medio es elevado ya que permite regulación o como centrales de bombeo, siendo la mejor manera de conseguir almacenar energía para grandes potencias.

El resto de centrales de recurso renovable que son de carácter imprevisible son utilizadas para la regulación del sistema, como lo pueden ser las centrales fotovoltaicas o las centrales de mar. Además, las centrales eólicas también son utilizadas y ahora se puede saber con antelación la cantidad y calidad de recurso que estará disponible.

Todo ello conlleva ciertos niveles de dificultad a la hora de gestionar el sistema eléctrico porque si se quiere ganar seguridad en el suministro de energía, además de respetar el medioambiente, provocando menores daños e impactos al mismo, se debe aumentar y mejorar los sistemas de generación mediante energía renovable. Por tanto, los objetivos principales son conseguir un abaratamiento de costes en estas tipologías de generación y una reducción del impacto que conlleva su uso en nuestro sistema eléctrico, en especial por los recursos renovables de carácter imprevisible. Los transformadores eléctricos toman un papel muy importante en lo que concierne al suministro de energía eléctrica mediante líneas de transmisión, además también se requiere su utilización en los diferentes puntos de generación de energía.

El transformador es una máquina eléctrica estática que trabaja con corriente alterna y es capaz de transformar la energía eléctrica. Está constituido por dos devanados, uno de entrada y otro de salida. Las magnitudes eléctricas del devanado de entrada serán transformadas para dar unas magnitudes distintas en el devanado de salida.

Como se ha comentado anteriormente, esta característica hace que los transformadores sean la herramienta que hace posible el funcionamiento del sistema de redes eléctricas y la transmisión de energía a largas distancias. Al ser posible aumentar el nivel de tensión producido por las centrales de generación en los puntos de partida de la energía eléctrica, se disminuye la corriente que circula por los cables para una potencia de transmisión determinada.

Existe una limitación en las centrales de generación que deja los valores de las tensiones generadas oscilando entre **15 y 30 kV**. Estos valores de tensión no son suficientes para un eficiente transporte de la energía eléctrica, por eso es tan importante la utilización de los transformadores.

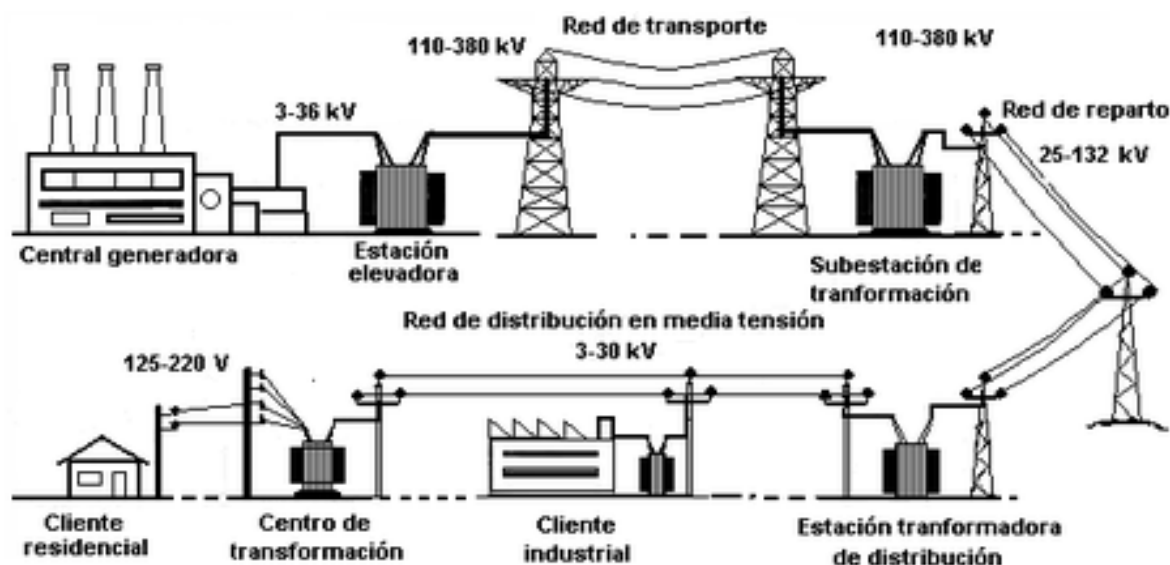


Figura 3 Sistema de suministro eléctrico. (Wikipedia). [5]

Otro punto a tener en cuenta es que los transformadores no solo son utilizados para elevar la tensión, sino que son necesarios para poder alimentar las cargas introducidas en el sistema, ya que por lo general sus parámetros de trabajo son menores que los valores alcanzados para el transporte de la energía. Como se puede ver en la **Figura 3**, desde que se produce la electricidad hasta que le llega a un cliente residencial, es posible que tenga que pasar por 4 procesos de transformación de energía. Por todo lo nombrado anteriormente, es importante recordar la importancia que tiene el transformador en el desarrollo de nuestra industria eléctrica, por ello se desarrollará en este trabajo una metodología de optimización que nos permita mejorar las características y propiedades de estas máquinas eléctricas y así poder reducir el gran coste que supone cada uno de los transformadores implementados en el sistema, además de poder mejorar la eficiencia energética.

5 Objetivos del TFG

El objetivo de este trabajo de fin de grado se basa en la simulación, caracterización y optimización térmica y eléctrica de un transformador trifásico de 4000 VA. Para ello se utilizarán dos métodos distintos pero complementarios, mediante los cuales se podrá conseguir un estudio completo del transformador.

Primero, se realizará un estudio sobre el transformador real. Este estudio se dividirá en tres partes: Vacío, Cortocircuito y Carga. Para ello se desarrollará una bancada de ensayos preparada en el laboratorio, en la que se realizarán las conexiones pertinentes para cada ensayo y se alimentará por medio de una fuente de tensión de alterna al transformador. Se usará principalmente un medidor digital de potencia y unas sondas de temperatura para poder analizar los valores eléctricos obtenidos, así como las propiedades térmicas, respectivamente.

Para la validación de nuestro modelo, se realizan ambas pruebas, eléctrica y térmica mediante una simulación con la ayuda del programa ANSYS. Utilizando su software "MAXWELL 2D" se representará nuestro transformador realizando un modelo equivalente en dos dimensiones. Para ello, se introduce la geometría de nuestra máquina, se asignarán los materiales correspondientes, se establecerá un mallado acorde a las necesidades de cálculo y por último se realizarán las conexiones de su circuito eléctrico para cada caso de estudio. Después, se ejecutarán las simulaciones correspondientes para la obtención de los resultados y su posterior análisis. También, gracias al software del programa "TRANSIENT THERMAL" se podrá obtener los resultados de las características térmicas del transformador cuando se ve sometido a los diferentes ensayos.

Adicionalmente, se propone una metodología de optimización mediante el uso del software de elementos finitos de ANSYS, con el fin de disminuir costes de fabricación mediante el análisis de unas variables de control definidas, como son la temperatura o la saturación magnética, obtenidas en el funcionamiento en carga de la máquina.

6 Descripción Teórica.

A continuación, se realizará una introducción teórica de las máquinas eléctricas, centrándose después en los transformadores, ya que será este tipo de máquina la que se analizará a fondo en este trabajo de fin de grado.

El electromagnetismo es uno de los términos más importantes a la hora de hablar de las máquinas eléctricas y queda definido de la siguiente manera: [6] “Rama de la física que se ocupa del magnetismo producido por la corriente eléctrica y de la interacción de los campos eléctricos y magnéticos.” Se hará referencia a dos de los científicos más importantes especializados en esta rama de la física, como son Michael Faraday [7], al que se le considera el padre del electromagnetismo gracias a su Ley de Inducción [8], y James Clerk Maxwell [9], quien unificó la electricidad, el magnetismo y la luz y formuló las ecuaciones del electromagnetismo.

6.1 Campos eléctrico y magnético.

Se definen a continuación los conceptos de campos eléctrico y magnético, ya que son la base sobre la que se erigen las máquinas eléctricas. Para ello se usarán algunos de los conceptos aportados por el Doctor Ingeniero Industrial, Miguel Ángel Rodríguez Pozueta en su aporte a la asignatura de Máquinas Eléctricas I de la Universidad de Cantabria. [10]

Todo campo consiste en la aparición de un fenómeno físico en un espacio determinado. El caso del campo eléctrico se puede describir como la aparición de una fuerza sobre una carga eléctrica situada en la zona de acción de dicho campo. Las magnitudes que definen este campo son la intensidad del campo \vec{E} que es el valor de la fuerza que se ejerce sobre la carga, y el desplazamiento eléctrico \vec{D} que no dependerá del medio en el que se encuentre.

Estas dos magnitudes se relacionan mediante una constante, que es la permitividad absoluta del medio, y dependerá como su nombre indica del medio en el que se encuentre. A continuación, se muestra la fórmula correspondiente, **Fórmula 1**:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

Fórmula 1. Ecuación del campo eléctrico.

Donde \vec{D} es el desplazamiento eléctrico, ϵ es la permitividad absoluta del medio y \vec{E} es la intensidad del campo eléctrico.

El desplazamiento eléctrico \vec{D} se mide en C/cm^2 (Culombios/ cm^2) y la intensidad del campo eléctrico \vec{E} se mide en V/m (voltios/metro).

Ahora bien, para el caso del campo magnético, se necesita que en la zona de acción de dicho campo haya una carga eléctrica en movimiento para que aparezca una fuerza sobre ella. Se va a caracterizar por la magnitud \vec{B} o inducción magnética y quedará definido por la siguiente ecuación, **Fórmula 2**:

$$\vec{F} = q (\vec{v} \times \vec{B})$$

Fórmula 2. Ecuación del campo magnético.

donde \vec{F} es la fuerza magnética medida en N (Newtons), \vec{v} es la velocidad en m/s (metros/segundo), \vec{B} el campo magnético en T (Teslas) y q es una carga eléctrica puntual medida en C (Culombios).

La fuerza que aparece sobre una carga en movimiento en el seno de un campo magnético se denomina fuerza de Lorentz. Se ve que la fórmula incluye un producto vectorial de la velocidad a la que se mueve la carga por el valor de la inducción magnética.

El campo magnético que se va a tratar estará originado por una o varias corrientes eléctricas, sin embargo, este podría estar originado por un imán permanente o por campos eléctricos variables en el tiempo.

Se puede definir la inducción magnética a partir de la siguiente ecuación, **Fórmula 3**:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

Fórmula 3. Ecuación de la inducción magnética.

Donde \vec{B} es la magnitud de la inducción magnética en T (Teslas), μ es la permeabilidad del medio y se mide en H/m (Henrios/metro) o N/A² (Newton/Amperios²) y \vec{H} es la excitación magnética medida en A/m (Amperios/metro).

La inducción magnética está definida por el producto de dos magnitudes, una constante μ , que depende del medio en el que se produzca el campo y recibe el nombre de permeabilidad magnética absoluta, y otra magnitud vectorial \vec{H} , llamada excitación magnética o intensidad magnetizante, que dependerá del tipo de campo magnético creado o del origen de su creación.

6.2 Inducción Electromagnética.

La Ley de Inducción de Faraday dice que siempre que haya un campo magnético variable en el tiempo, se generará un campo eléctrico a partir de este. Por tanto, cuando conductores eléctricos están sometidos a la actuación de un campo magnético variable, aparecen en ellos unas fuerzas electromotrices que pueden ser aprovechadas como energía eléctrica.

La **Fórmula 4**, es la fórmula de la fuerza eléctrica generada en una espira por la acción de un campo magnético variable es de la siguiente manera según la Ley de Faraday.

$$e = \frac{d\phi}{dt}$$

Fórmula 4. Ecuación de la fuerza contraelectromotriz.

Donde e es el voltaje inducido en V (Voltios), $d\phi$ es el diferencial del flujo magnético en W (Webers) y dt es el diferencial de tiempo en S (Segundos).

Ahora bien, aquí es donde aparece la Ley de Lenz, **Fórmula 5**, que da el signo correcto para la fuerza que se genera. Según sus comprobaciones, enunció que toda fuerza electromotriz inducida tendrá un sentido de forma que la corriente generada de lugar a un flujo magnético que se oponga a las variaciones de flujo originarias.

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

Fórmula 5. Ecuación de la fuerza electromotriz.

Donde e es el voltaje inducido en V (Voltios), $d\phi$ es el diferencial del flujo magnético en W (Webers) y dt es el diferencial de tiempo en S (Segundos).

6.3 Materiales Magnéticos.

Se va a realizar a continuación una clasificación de los distintos materiales magnéticos que se pueden encontrar. Esto ayudará a entender más adelante la manera en la que se comportarán las máquinas eléctricas, además de comprender mejor los diferentes tipos de pérdidas de energía que se producen.

6.3.1 Materiales Diamagnéticos.

Estos materiales se caracterizan por tener sus átomos una distribución neutra, cuando no se encuentran en presencia de un campo magnético. Pero bajo la acción de un campo magnético, se genera en ellos una reacción opuesta. Esto quiere decir que su susceptibilidad magnética es negativa, $\chi_m < 0$. Entre ellos se encuentran el bismuto, el oro, la plata y el cobre.

Su permeabilidad magnética es menor que la del vacío, pero la diferencia es tan pequeña que se suele tomar la propia del vacío. Esto conlleva a que su permeabilidad relativa sea igual a 1.

6.3.2 Materiales Paramagnéticos.

El comportamiento de este material se podría asemejar a un comportamiento neutro cuando no está bajo la acción de un campo magnético, porque, aunque la distribución de sus átomos no anula el efecto magnético entre sí, al estar distribuidos de forma aleatoria no se apreciará un efecto neto.

Su susceptibilidad magnética es positiva, $\chi_m > 0$. Esto quiere decir que bajo la acción de un campo magnético se producirá una reacción en sus moléculas que hará que estas se orienten en la dirección del campo magnético.

Estos materiales están influidos por la temperatura, que hará que las fuerzas sean menores cuando ésta aumenta. Algunos de ellos son: el aire, el magnesio, el titanio o el wolframio.

Al igual que los materiales diamagnéticos, su permeabilidad es prácticamente la de vacío, por tanto, se traduce en una permeabilidad relativa igual a 1. Por esto, estos dos materiales vistos hasta ahora se engloban dentro del grupo de materiales “amagnéticos”.

6.3.3 Materiales Ferromagnéticos.

Estos materiales presentan los que se conoce como “dominio magnético”, y supone que sus átomos estén alineados formando un campo magnético, es decir, un imán. Pero cuando no existe presencia de campo magnético externo, sus átomos están ordenados de forma aleatoria por tanto no existe este efecto magnético.

Estos materiales se caracterizan por aumentar la magnitud del campo magnético al que están sometidos. Sin embargo, cuando deja de estar presente un campo magnético externo, los dominios magnéticos orientados en la dirección de ese campo no recuperan su estado inicial, si no que permanecen orientados, constituyendo ahora nuestro material, un imán permanente.

Los más comunes son: el hierro, el cobalto o el níquel. También dependen de la temperatura, perdiendo sus propiedades ferromagnéticas cuando superan cierta temperatura y pasando a comportarse como materiales paramagnéticos. Su permeabilidad magnética es mayor que la del vacío y además no es constante.

6.4 Máquinas Eléctricas.

Las máquinas eléctricas son el elemento fundamental de la industria energética y se usan en todos los procesos del sistema eléctrico, a saber: generación, transmisión, distribución y consumo. El principio de las máquinas eléctricas es la conversión de energía, siendo siempre eléctrica, al menos, una de sus formas energéticas. Quedan definidos tres tipos de máquinas atendiendo a este fenómeno de conversión:

6.4.1 Generador:

Este tipo de máquina eléctrica va a transformar la energía mecánica en eléctrica.

6.4.2 Motor:

Este tipo de máquina eléctrica va a transformar la energía eléctrica en mecánica.

6.4.3 Transformador:

Este tipo de máquina eléctrica no realizará una conversión de energía como tal, ya que tanto en su entrada como en su salida la forma de energía será eléctrica. Gracias a esta máquina que trabajará solo en corriente alterna, como ya veremos más adelante, seremos capaces de obtener valores distintos de energía eléctrica a la entrada y la salida de la misma.

6.5 Elementos de las máquinas eléctricas.

Se definen en este apartado algunos de los elementos básicos que constituyen las máquinas eléctricas. Con la salvedad del transformador de potencia, las máquinas eléctricas son denominadas rotativas, ya que cuentan con una parte móvil que hace posible su funcionamiento. Es decir, para que el principio físico en el que se basan se cumpla, es necesaria esta condición de utilizar una parte móvil en su constitución.

Por tanto, se encuentran por norma general dos partes en las máquinas eléctricas. Una de ellas recibe el nombre de **estator** y la otra es el **rotor**. Se pueden diferenciar en las imágenes **Figura 4** y **Figura 5**.

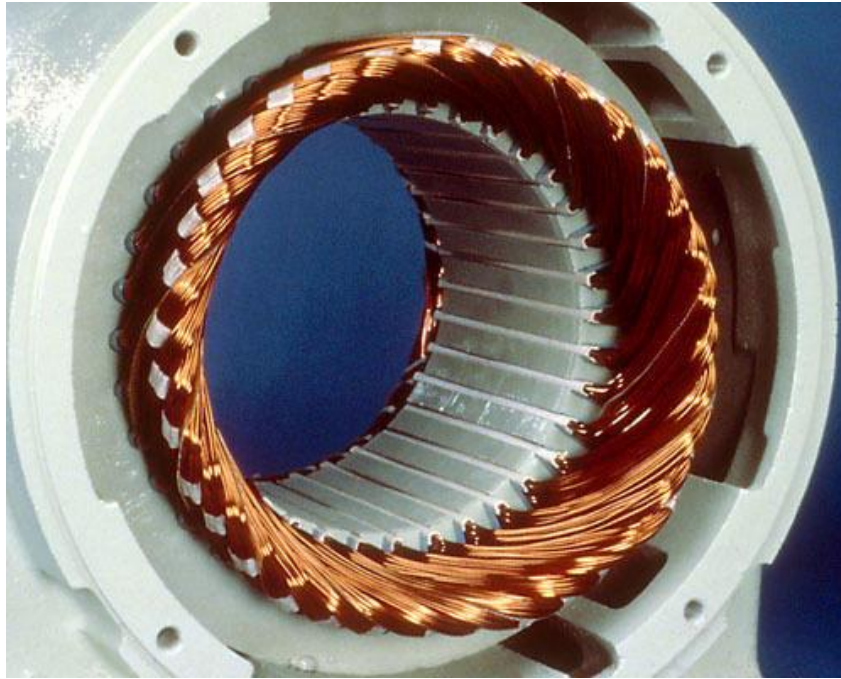


Figura 4 Estator de un motor eléctrico. [11]



Figura 5 Rotor de un motor eléctrico. [12]

El **estator** es la parte fija de la máquina y tiene forma de cilindro hueco. Posee un núcleo magnético sobre el que se arrollan sus bobinas. Está rodeado de una carcasa que evita que la máquina entre en contacto con el exterior.

El **rotor** es, por tanto, la parte móvil de la máquina comentada anteriormente. Esta parte también posee un núcleo magnético sobre el que se bobinan sus correspondientes devanados.

Tanto en el rotor como en el estator, las máquinas eléctricas acostumbran a tener sistemas de ventilación, dadas las altas temperaturas que se pueden llegar a alcanzar cuando están en funcionamiento. Estos sistemas pueden ser las aletas de refrigeración, para una mayor convección, ventiladores, canales de ventilación, etc.

El rotor se sitúa en el interior del estator y es en la separación que hay entre ellos donde se producen los fenómenos físicos que dan lugar al funcionamiento de la máquina. Esta separación por la que circula el aire es denominada **entrehierro** de la máquina eléctrica.

Las máquinas eléctricas están constituidas por 2 devanados, el devanado inductor y el devanado inducido. Por lo general el devanado inductor es el que se encarga de generar el campo magnético. Este arrollamiento también es llamado **excitación o campo**. El inducido o **armadura**, recoge el campo magnético creado y lo utiliza para dar lugar a unas fuerzas electromotrices en su seno. Para el caso de los transformadores se suele denominar devanado primario al devanado inductor y devanado secundario al inducido.

Otros elementos de las máquinas eléctricas son los **colectores**. Colectores de **anillos**, que se utilizan en las máquinas de corriente alterna y colectores de **delgas** que se pueden usar también en máquinas de corriente continua.

Los primeros consisten en unos anillos aislados entre sí, que están conectados a los arrollamientos del rotor. Se colocan sobre el eje, pero están aislados de este. Los anillos suelen ser de bronce y sobre ellos hacen contacto unas escobillas de grafito.

Para máquinas con devanados cerrados se utilizan los conmutadores o colectores de delgas, que son láminas de cobre formando un cuerpo cilíndrico alrededor del rotor. Al igual que en los colectores de anillos, van aisladas entre sí y con el eje. Se conectan a los arrollamientos del rotor mediante soldaduras.

En los dos casos, las delgas van fijas al estator y rozan sobre los colectores, transmitiendo la corriente del circuito exterior a la máquina. Para el caso de las delgas, la corriente que entra en la máquina no tiene la misma forma que la del circuito externo debido a la conmutación que se produce.

6.6 El transformador.

Es importante entender bien el funcionamiento de un transformador antes de ver el estudio que se va a realizar en este proyecto. Por tanto, en este apartado teórico, se definirán y explicarán exhaustivamente todos los aspectos relacionados con los transformadores, así como se describirán sus elementos y sus aplicaciones en la industria de hoy en día.

Uno de los elementos importantes de un transformador es el devanado. Un devanado, en máquinas eléctricas, queda definido como el arrollamiento de hilo de un material, buen conductor de la electricidad, alrededor de un núcleo de material ferromagnético.

Este hilo conductor suele estar hecho de cobre, dadas sus buenas propiedades físicas y mecánicas, siendo un material que, además de su buena conductividad eléctrica, es muy fácil de trabajar con él para producir láminas o hilos muy finos gracias a su ductilidad y maleabilidad. Estas características lo convierten en un material idóneo para la realización de las máquinas eléctricas entre otras de sus muchas aplicaciones en los sectores de telecomunicaciones, medios de transporte, construcción, etc.

6.6.1 Funcionamiento.

Se definieron anteriormente algunos de los términos más utilizados en lo que se refiere al entorno de la electricidad y más concretamente a las máquinas eléctricas, por tanto, se puede entender bien la constitución de un transformador y su funcionamiento.

Un transformador consta de dos devanados independientes arrollados sobre un núcleo de material ferromagnético. El devanado por el que es alimentado la máquina se suele definir como el devanado **primario** y el devanado por el que sale la energía eléctrica hacia la carga se denomina devanado **secundario**. Como se comentó en el apartado de las máquinas eléctricas, cuando se definió al transformador se dijo que éste realiza una conversión del nivel de tensión, teniendo una tensión de entrada, “E1”, y una tensión con valor diferente a la salida, “E2”. Esto se debe a que los devanados tienen distinto número de espiras, caracterizando de esta manera la relación de transformación de nuestra máquina, **Fórmula 6**.

$$m = \frac{N1}{N2} = \frac{E1}{E2} = \frac{I2}{I1}$$

Fórmula 6. Ecuación de la relación de transformación.

Donde m es la magnitud constante, N1 y N2 son el número de espiras de los devanados primario y secundario respectivamente, E1 y E2 son los niveles de tensión a la entrada y salida del transformador y I1 e I2 son los valores de las corrientes en los circuitos primario y secundario.

Se establece de esta manera la relación entre entrada y salida del transformador, pudiendo prever para cada nivel de tensión utilizado a la entrada, el nivel de tensión que obtendremos a la salida.

Es importante dejar claro que los transformadores funcionan con corriente alterna, ya que se necesita un flujo variable en el tiempo para que se den los fenómenos físicos que lo caracterizan. Además, su funcionamiento es reversible, como toda máquina eléctrica. Por tanto, se definirá un lado de alta tensión y otro de baja tensión, pudiendo alimentarse la máquina por cualquiera de los dos indistintamente. Se tendrá, un transformador trabajando como **reductor** de la tensión para el caso de estar alimentándose su devanado primario con el nivel de tensión más alto, es decir en el lado que más espiras tenga. De lo contrario, el transformador será **elevador** de la tensión para el caso de que su alimentación sea por el lado de menos espiras o devanado de baja tensión.

La intensidad de entrada “I1” circula por el devanado primario. Al tratarse de una corriente alterna, y estar circulando arrollada sobre el núcleo ferromagnético, se genera un flujo magnético variable en el núcleo del transformador. Este flujo magnético variable en el tiempo es el que induce, como se indica en la Ley de Inducción de Faraday, una fuerza electromotriz en el devanado secundario. Esta fuerza electromotriz será nuestra tensión de salida “E2”.

Se puede representar el transformador por su circuito real [13], de la **Figura 6**.

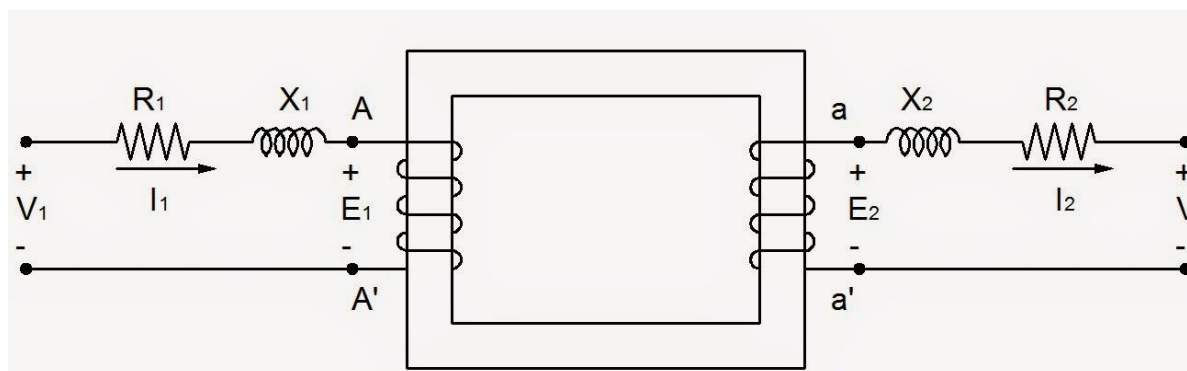


Figura 6 Circuito real del transformador. [13]

Como se ve en la imagen, tanto el devanado primario como el secundario se representan por una resistencia y una reactancia. El núcleo magnético se corresponde con un transformador monofásico de columnas. Consta de dos columnas donde van arrolladas las espiras. Aunque por comodidad se represente de esta manera, lo cierto es que los devanados van arrollados de otra forma. Primero se constituye el devanado de baja tensión, que se reparte entre las dos columnas, la mitad en una y la mitad en otra. Después, se aplica un aislante para que no exista contacto entre el devanado de baja tensión y el devanado de alta tensión que se va a colocar encima. Se arrollará de la misma manera, una mitad en cada columna. Esto ayuda a que se reduzcan los flujos de dispersión que se producirían al no realizarse de esta manera, ya que algunas de las líneas de campo magnético no llegarían al otro devanado.

6.7 Pérdidas.

Se definen las pérdidas de energía en las máquinas eléctricas, ya que estarán muy presentes en el estudio y serán importantes a la hora de realizar los cálculos de la máquina.

En todo proceso de transformación de energía se producen unas pérdidas, como es el caso de la electromecánica, una parte de la energía transformada se convertirá en calor y no podrá ser utilizada útilmente por nuestra máquina eléctrica.

Se pueden englobar las pérdidas de energía en 3 grandes grupos: Pérdidas en el cobre, pérdidas en el hierro y pérdidas mecánicas. **[14]**

6.7.1 Pérdidas en el cobre:

Son llamadas así ya que en la mayor parte de los casos el material utilizado para los arrollamientos de las máquinas eléctricas es el cobre **[15]**, sin embargo, también se podría estar hablando de las mismas pérdidas, pero refiriéndose a las del aluminio. El término correcto sería el de “Pérdidas por efecto Joule”.

Estas pérdidas, producidas por el paso de la corriente, se deben a la resistencia inherente al material de los conductores y se traducirán en calor. Podemos verlo en la **Fórmula 7**:

$$P_{cu} = \sum R_j i_j^2$$

Fórmula 7. Ecuación de pérdidas en el cobre.

Donde P_{cu} es el valor de pérdidas en W (Watios), R_j es el valor de la resistencia del material conductor en Ω (Ohmios) y i_j es la intensidad que circula por el material en A (Amperios). “ R_j ” hace referencia a la resistencia total de un bobinado “j”, e “ i_j^2 ” será el cuadrado de la corriente que pasará a través de este.

6.7.2 Pérdidas en el hierro:

También pueden denominarse pérdidas de vacío o rotacionales, ya que cuando la máquina está trabajando en vacío solo se producirán estas pérdidas. Aquí se estará hablando de los fenómenos de histéresis [16] y de las corrientes parásitas o de Foucault. Para entender mejor el fenómeno de histéresis se ve la siguiente fotografía, **Figura 7**.

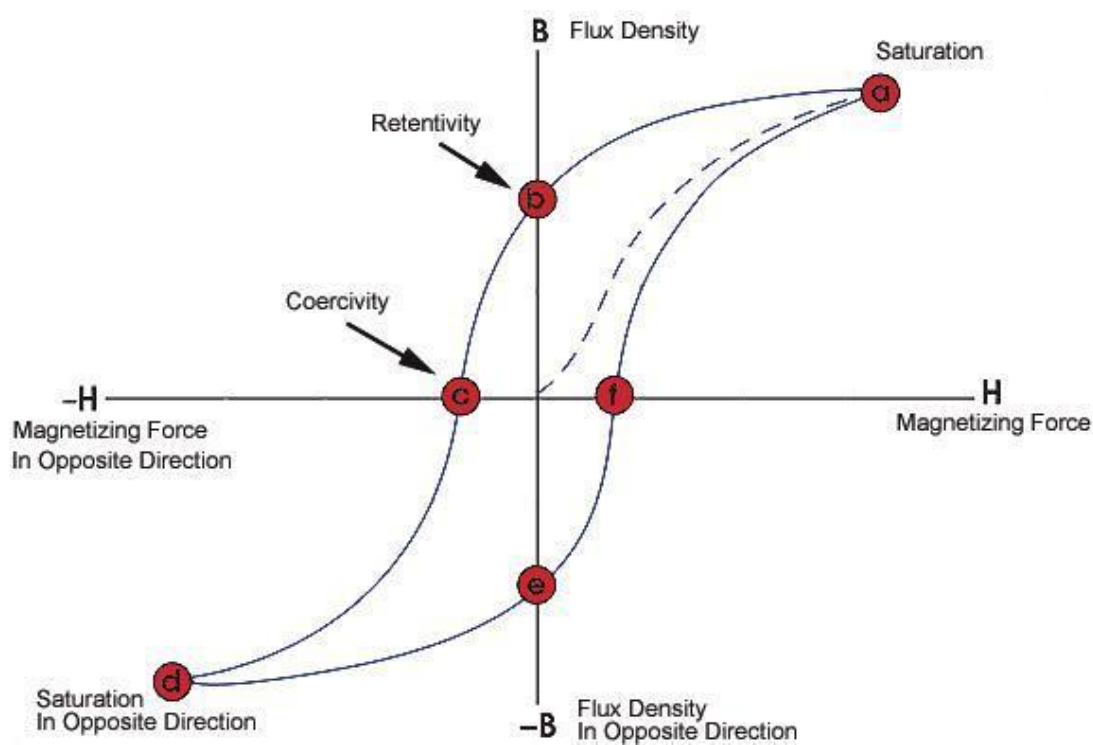


Figura 7

Fenómeno de histéresis. [16]

La histéresis es la propiedad que tiene un material de conservar alguna o varias de las propiedades que fueron generadas por diferentes estímulos, pero en ausencia de estos. [17]

En este caso, para un material magnético a una densidad de flujo magnético “B” con su correspondiente fuerza magnetizante “H”, aumentar la fuerza del campo conlleva un aumento del campo magnético “B”, saturando el material y alcanzando el punto “a” de la **Figura 7** . Al disminuir ahora la fuerza o intensidad magnetizante “H”, el material ya no sigue la misma curva, pasando por los puntos “b” y “c”, esto es debido a que los “dominios magnéticos” comentados en el apartado de materiales ferromagnéticos, no recuperan su estado inicial, conservando parte del magnetismo que tenían.

En cuanto a las corrientes parásitas o de Foucault, estas se producen siempre que hay una variación de flujo magnético en cualquier material conductor. En los núcleos ferromagnéticos de los transformadores es un punto a tener muy en cuenta ya que genera gran parte de las pérdidas de energía. Una manera de reducir estas pérdidas es sustituyendo el núcleo magnético macizo por una elaborado con chapas magnéticas muy finas y aisladas entre sí, esto conseguirá que las corrientes inducidas en las chapas debido a las fuerzas electromotrices generadas sean muy pequeñas en magnitud, reduciendo así las pérdidas de energías ocasionadas por efecto Joule. [18]

6.7.3 Pérdidas mecánicas:

Se producen por la fricción o los rozamientos de los distintos elementos de las máquinas eléctricas rotativas. Además, hay que tener en cuenta una parte debida a la ventilación de las mismas.

Este estudio no se centrará en explicar este tipo de pérdidas ya que para este trabajo de fin de grado se realiza un estudio de un transformador. Siendo una máquina eléctrica estática, solo habrá pérdidas en el cobre y en el hierro.

6.8 Tipología de Ensayos.

Se tratará en este apartado los 3 tipos de ensayos que se realizan para determinar las características técnicas de las máquinas eléctricas. El ensayo de Vacío, el de Cortocircuito y el de Carga. [19]

6.8.1 Vacío.

El ensayo de vacío de un transformador se realiza para determinar las pérdidas de potencia en el núcleo ferromagnético. En la siguiente imagen, **Figura 8**, se puede ver el circuito eléctrico que representa las conexiones de un ensayo de vacío para un transformador monofásico.

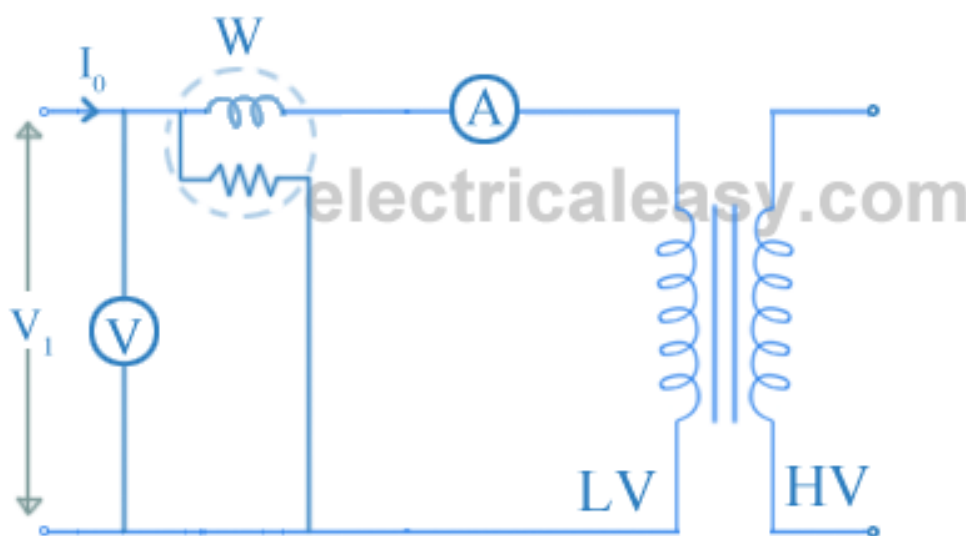


Figura 8 Circuito eléctrico para un ensayo de vacío en un transformador monofásico. [19]

Para determinar el valor de las pérdidas en el núcleo es necesario conectar un voltímetro y un amperímetro en el devanado primario. Como se puede apreciar en la imagen el ensayo se ha realizado alimentando al transformador por el devanado de baja tensión o “low voltage winding”. Se dará tensión al devanado primario, incrementando su magnitud hasta llegar a la tensión requerida para el ensayo, que normalmente se establecerá en la nominal de la máquina. El devanado secundario está en circuito abierto, por tanto, no habrá corriente secundaria, lo que se traduce en unas pérdidas en el cobre nulas. Esto quiere decir que la potencia de entrada en el devanado secundario se puede igualar con las pérdidas en el núcleo magnético.

6.8.2 Cortocircuito.

Como se puede ver en la **Figura 9**, para el ensayo de cortocircuito el devanado secundario estará cortocircuitado. Además, se realizará como está indicado en la imagen, alimentando a la máquina por el devanado de alta tensión o “high voltage winding”. También se conectará un voltímetro y un amperímetro en el devanado primario para realizar el cálculo de las pérdidas de energía. Ahora se incrementará el valor de la tensión, hasta que en el amperímetro se pueda leer el valor de la corriente nominal de la máquina. Este ensayo permitirá ver el cálculo de las pérdidas en cobre, dado que, al estar cortocircuitado el devanado secundario, la corriente nominal en el primario se alcanza cuando el nivel de tensión es muy bajo comparado con la tensión nominal de la máquina. Esto hace que las pérdidas en el núcleo magnético sean mínimas, pudiendo obviarlas en comparación con las que se producen en el cobre.

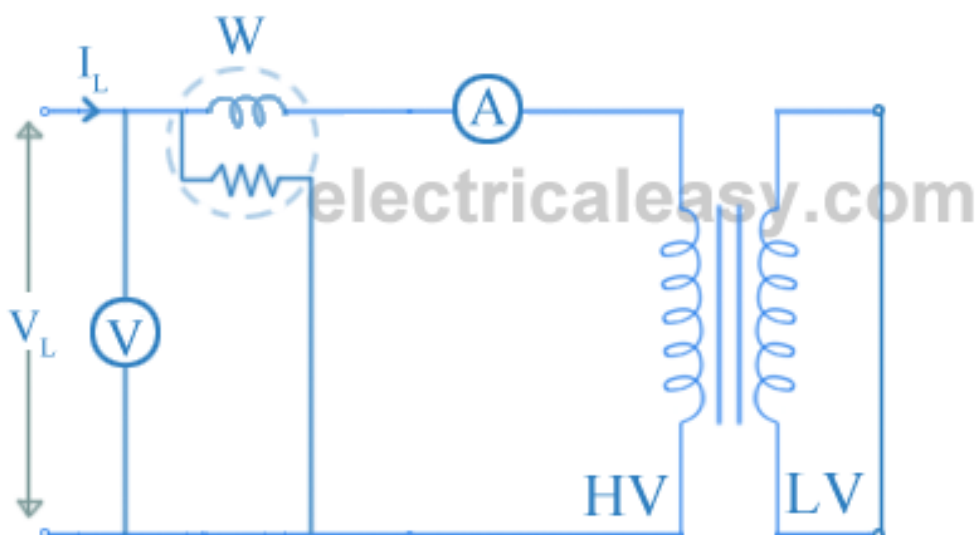


Figura 9 Circuito eléctrico para un ensayo de cortocircuito en un transformador monofásico. [19]

Por tanto, este ensayo permitirá determinar las pérdidas en el cobre de la máquina eléctrica.

6.8.3 Carga.

El ensayo de carga no permite determinar parámetros característicos de las máquinas eléctricas, sin embargo, si permite ver las características de la máquina cuando se le somete a una situación de trabajo con una carga nominal y unas magnitudes de tensión y corriente nominales. En este caso, el devanado secundario de la máquina no estará en circuito abierto o cortocircuito, si no que entre sus terminales habrá que conectar una carga resistiva.

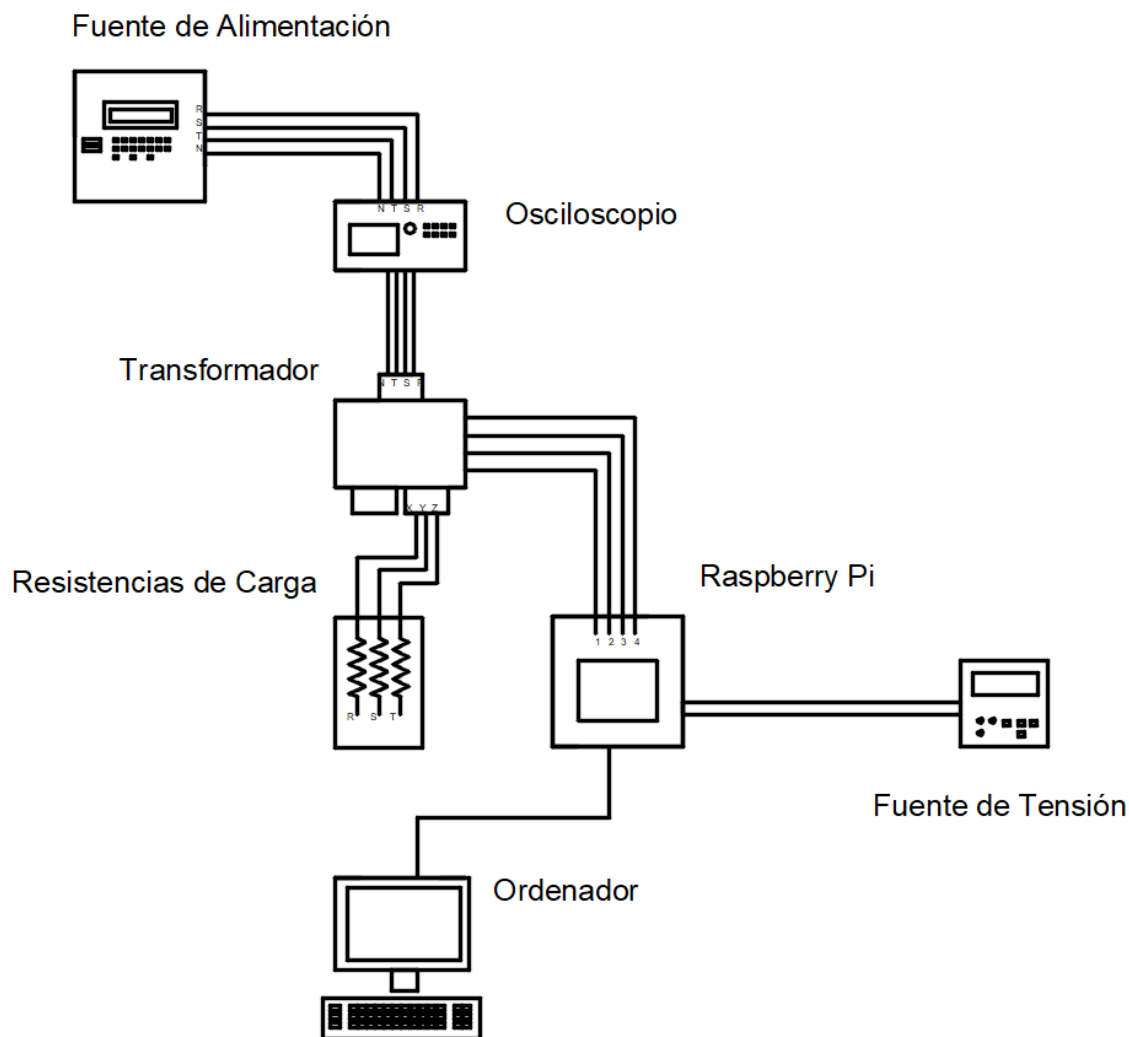
7 Bancada de ensayos.

En este punto, se va a ilustrar todo el procedimiento seguido en nuestro laboratorio de pruebas. Como se vio en los objetivos del proyecto, se realizarán dos estudios sobre un transformador trifásico de 4000 VA. El primero de ellos será un estudio eléctrico, mediante el cual quedará caracterizado el transformador. En la descripción teórica se mostró la tipología de ensayos que se aplica a las máquinas eléctricas y para este caso, se seguirá el mismo procedimiento, dividiéndose así nuestro ensayo eléctrico en 3 partes: Vacío, Cortocircuito y Carga.

Después, habrá también un estudio térmico, el cual se irá realizando a medida que se hagan los ensayos de vacío, cortocircuito y carga. De esta manera, se sabrá cómo se comporta el transformador térmicamente ante las diferentes situaciones de trabajo o ensayo.

Para que quede claro la zona de trabajo en la que se va a realizar el estudio, se ha planteado un esquema inicial con los elementos que formarán parte de este trabajo, además de las conexiones que han de realizarse entre ellos. Se puede observar en el **Plano 1**.

Una vez visto el esquema de los elementos que van a tomar parte en este estudio, se puede comenzar con los ensayos a realizar. La distribución de los elementos de la bancada para cada uno de los ensayos será la misma, sin embargo, las conexiones a realizar para los devanados de nuestro transformador serán diferentes, existiendo una situación de conexionado para el ensayo de vacío, otra para el ensayo de cortocircuito y una última para el ensayo de carga. Estas variaciones de la conexión en los diferentes devanados del transformador quedarán definidas en los apartados correspondientes a cada ensayo. Además, existirán variaciones en las cargas conectadas a la salida de los devanados secundarios.



Plano 1 Esquema de la bancada de ensayos. (Elaboración propia). [20]

7.1 Estudio Eléctrico.

En la primera imagen, **Figura 10**, se tiene la placa de características de la máquina. Hay que recordar que se trata de un transformador trifásico con doble devanado secundario, el cual está diseñado para una potencia aparente nominal de **4000 VA**. Como también se puede ver en la imagen, está diseñado para trabajar tanto a **50** como a **60 Hz**. Además, se puede apreciar que su tensión nominal de alimentación en el caso de una conexión en estrella es de **400 V**, mientras que si se conecta en triángulo será de **230 V**.



Figura 10 Placa de características del transformador. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

En las figuras **Figura 11** y **Figura 12** se puede ver nuestro transformador en perspectiva, siendo el lado correspondiente a las salidas de los devanados secundarios el que queda de frente, además podemos ver el espacio dedicado a la bancada de ensayos en la que vamos a realizar todas las pruebas.

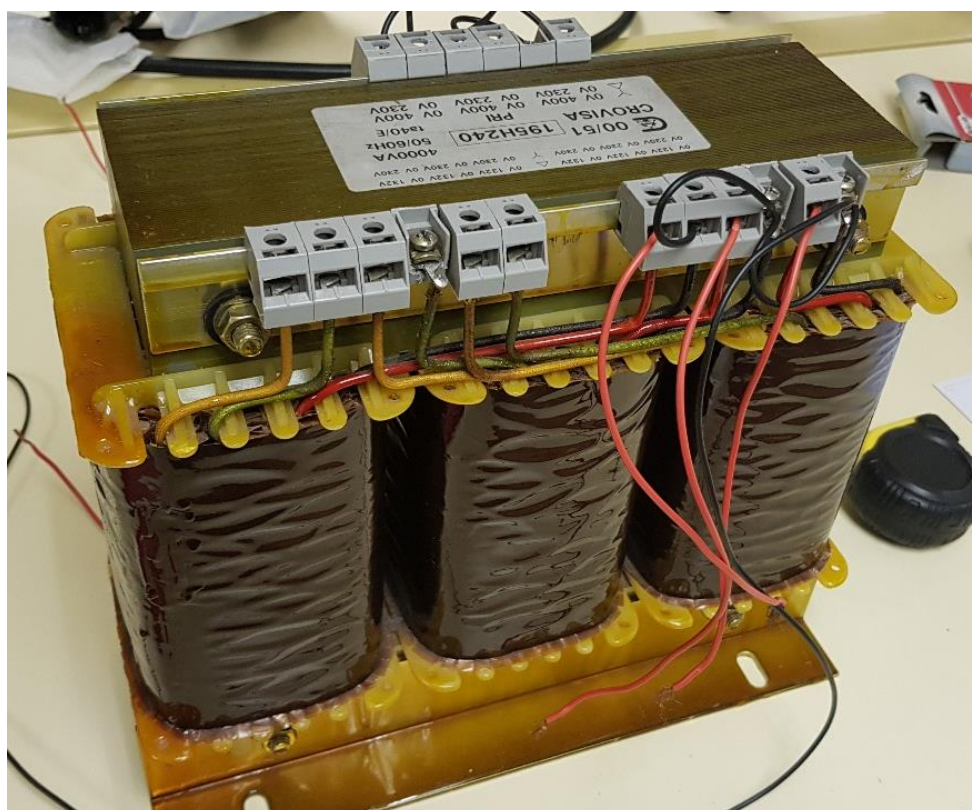
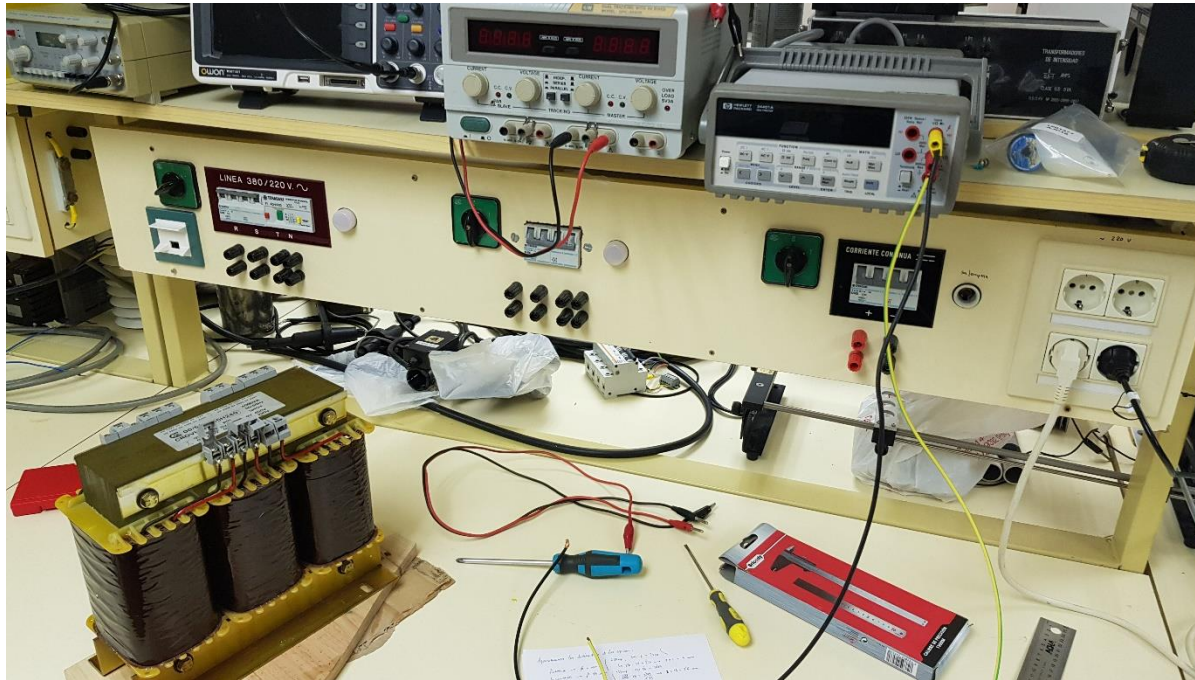


Figura 11 Lado de baja tensión del transformador. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

Se puede observar las tres columnas de bobinado que tiene nuestro transformador trifásico. También se ven las salidas de los devanados secundarios, en concreto 6 bornes. Los de la derecha se corresponden con las salidas de los devanados U, V y W definidos anteriormente en la simulación, mientras que los bornes del lado izquierdo de la imagen se corresponden con los devanados X, Y y Z.

**Figura 12**

1ª Imagen de la bancada de ensayos. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

Esta será la fuente de tensión alterna que se utilizará, **Figura 13** y **Figura 14**. Como se vio anteriormente, existirán ciertas limitaciones a la hora de realizar los ensayos, las cuales se irán detallando más adelante con cada prueba realizada. Esta fuente permite realizar ensayos que, si bien son determinantes a la hora de caracterizar al transformador, no serán realizados para las propiedades nominales de la máquina. Habrá una correspondencia exacta entre lo simulado en el programa “ANSYS” y lo estudiado en este apartado, por tanto, se podrá hacer una validación correcta de nuestro modelo.



Figura 13 Fuente de tensión de alterna vista de frente. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

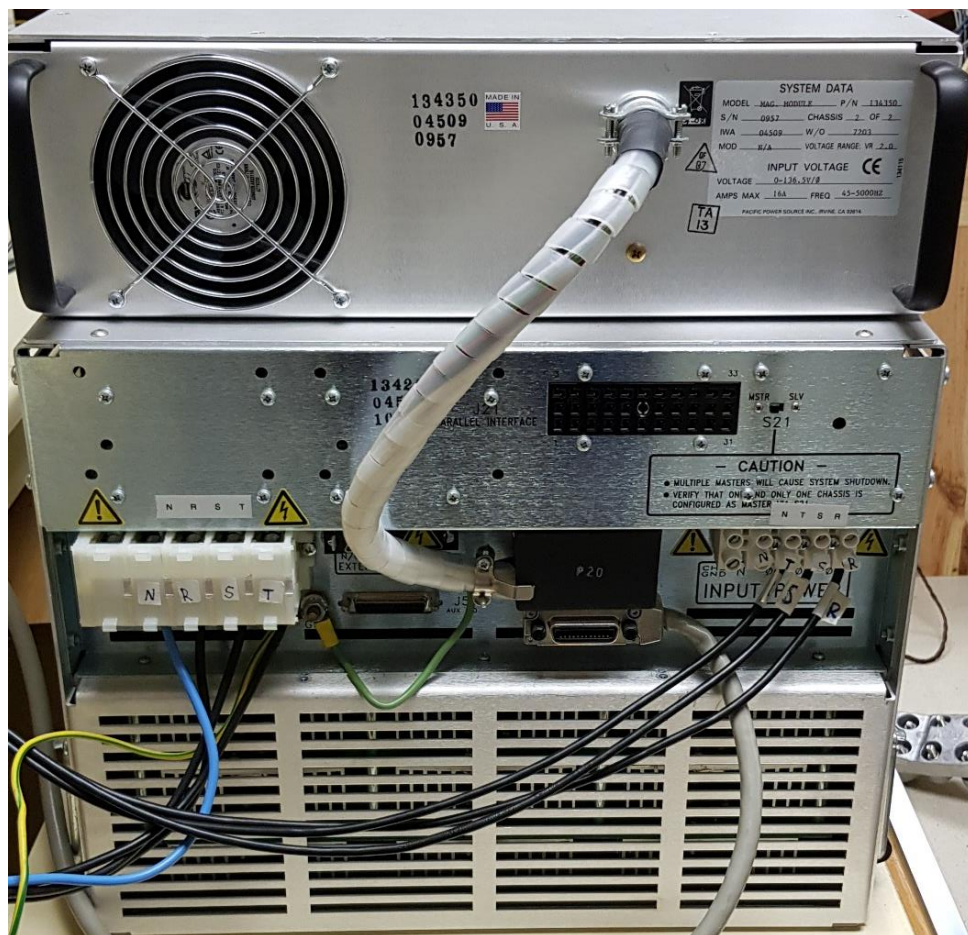


Figura 14 Fuente de tensión de alterna vista por detrás. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

Mediante el siguiente osciloscopio o medidor digital de potencia **Figura 15**, se podrán analizar las señales eléctricas que van a circular en el ensayo. Estará conectado a la fuente de tensión, acoplándose a este las tres señales de tensión alterna utilizadas para alimentar al transformador. Se podrá observar si la tensión suministrada se corresponde con la indicada por la fuente, además de poder ver las posibles variaciones o pérdidas de estabilidad experimentadas.



Figura 15 Medidor digital de potencia. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

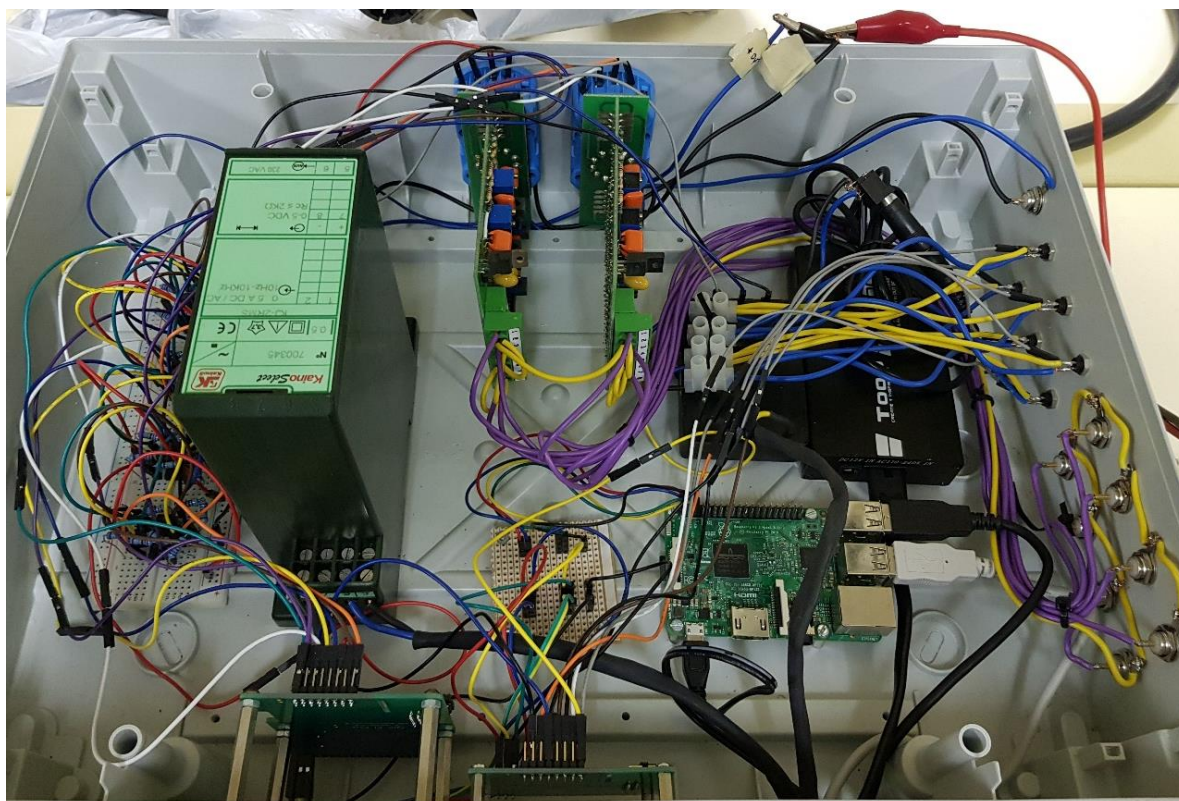


Figura 16 Raspberry Pi. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

Para analizar las variaciones de temperatura que experimentará el transformador en sus diferentes puntos, se utilizarán unas sondas térmicas. Estas sondas estarán conectadas a la Raspberry Pi que se puede observar en la **Figura 16** . Gracias a esto se monitorizarán las temperaturas alcanzadas por las sondas, reutilizando el código del proyecto “Desarrollo de plataforma de ensayos para estudio de comportamiento Térmico-Eléctrico de cables subterráneos”. En él se podrá ver el “set up” de la bancada de ensayos para obtener los resultados de temperaturas de las diferentes sondas utilizadas mediante programa de código en Python y a través de la Raspberry Pi. [21]



Figura 17 Fuente de tensión de continua. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

Esta fuente de tensión será utilizada para alimentar al sistema montado en la Raspberry Pi, **Figura 17** . La tensión de alimentación será de **12 V**.

7.1.1 Ensayo de Vacío.

El primer ensayo que se realizará será el ensayo de Vacío. Como se vio en la tipología de ensayos, el ensayo de Vacío consiste en comprobar el comportamiento de la máquina eléctrica cuando trabaja, pero sin alimentar o abastecer a ninguna carga. Por lo tanto, se realizarán las conexiones oportunas en el devanado primario del transformador y en uno de nuestros devanados secundarios, que será en el que se realice el estudio. Sin embargo, las conexiones a realizar en los devanados secundarios serán las internas propias de la distribución de bobinas de la máquina, ya que las salidas estarán en circuito abierto.

En la siguiente imagen, **Figura 18** , se ven las características de las ondas eléctricas conectadas a nuestro analizador digital. En el se pueden observar 6 ondas sinusoidales, 3 se corresponden con los devanados primarios del transformador y las otras restantes se corresponden con los devanados secundarios.

La tensión de alimentación de la fuente será de **132 V**, con esto se consigue que el nivel de voltaje entre bornes de los devanados primarios sea de **230 V** como se aprecia también en la imagen. Esto es debido a la conexión en “triángulo” utilizada para conexionar los devanados primarios. Se puede ver en la **Figura 19** . Además, se ve una correspondencia con la relación de transformación de la máquina, siendo la tensión de los devanados secundarios o de salida en este caso de **137 V**.

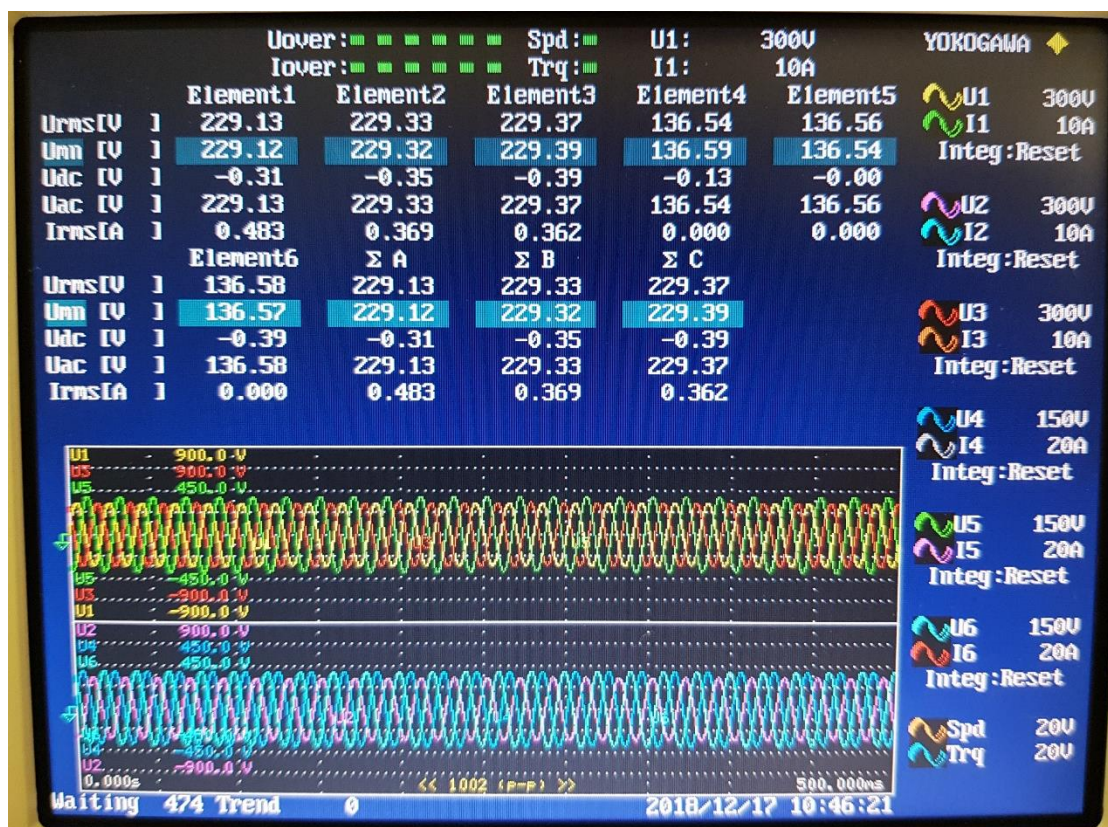
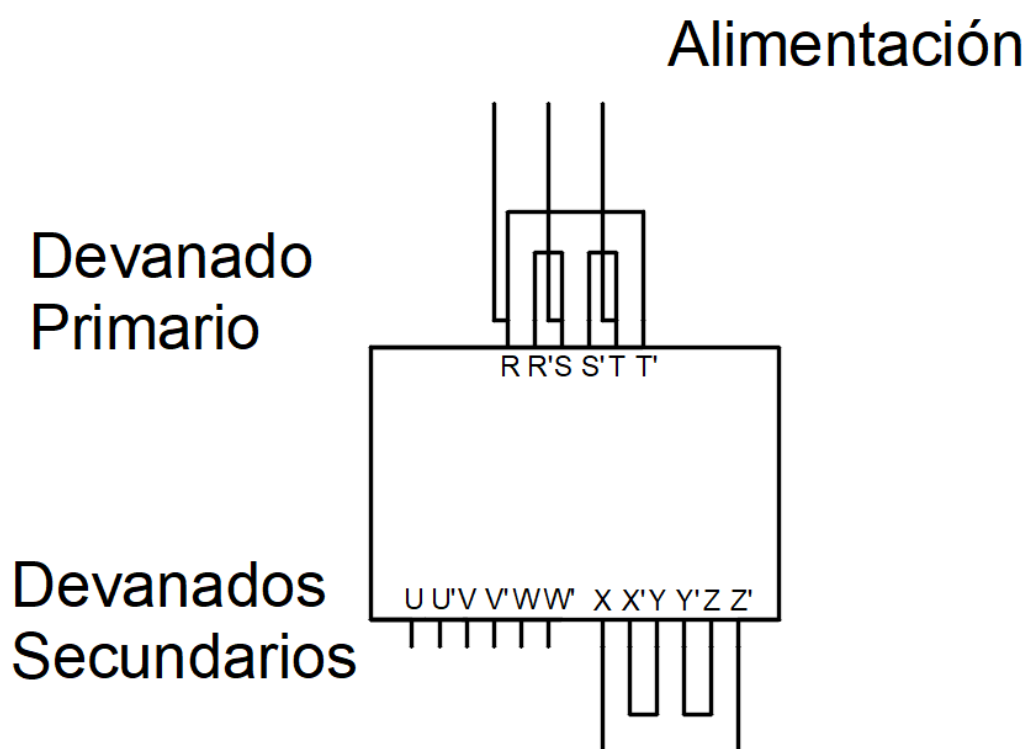


Figura 18 Representación valores ensayo de vacío. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).



Figura 19 Valores de la fuente para el ensayo de Vacío. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

En el siguiente plano, **Plano 2**, se ve el esquema de conexiones para el ensayo a realizar. Además, estará acompañado por las siguientes imágenes de la bancada de ensayos, **Figura 20** y **Figura 21**, mediante las cuales quedarán claras las conexiones utilizadas para este ensayo. Se ve como la entrada del devanado "R" está conectada a la salida del devanado "T", la salida del devanado "R" con la entrada del arrollamiento "S" y la salida de este último con la entrada de "T".



Plano 2 Esquema de conexiones del transformador para el ensayo de Vacío.
(Elaboración propia). [20]

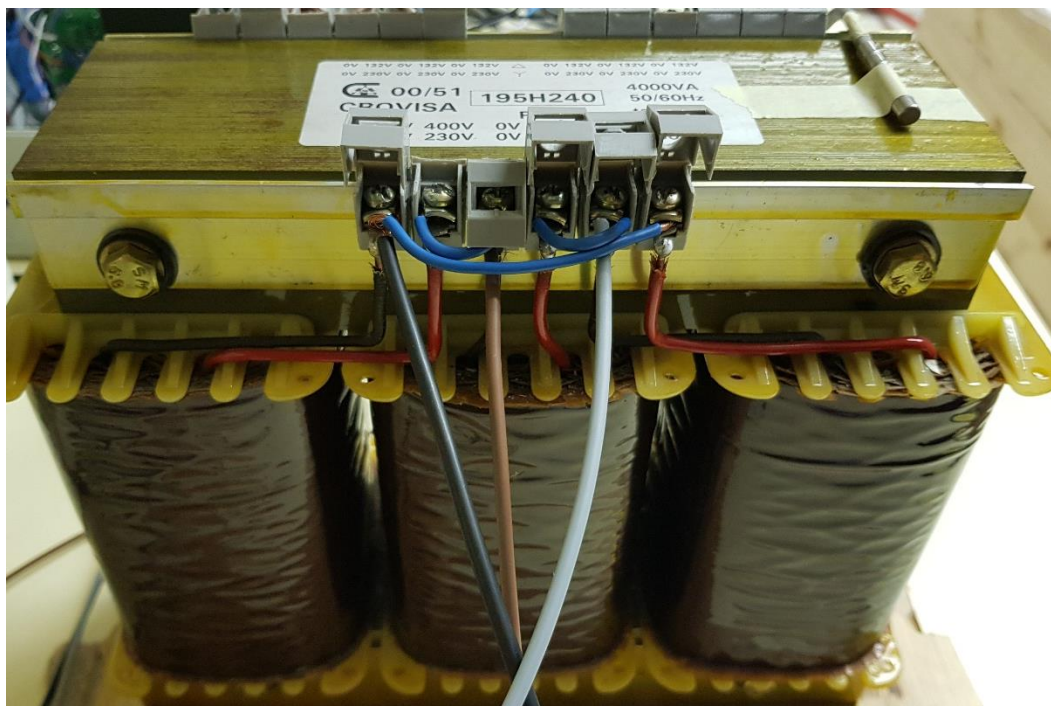


Figura 20 Conexiones para el lado de alta tensión en vacío. (Elaboración propia, fotografía tomada en la bancada de ensayos).

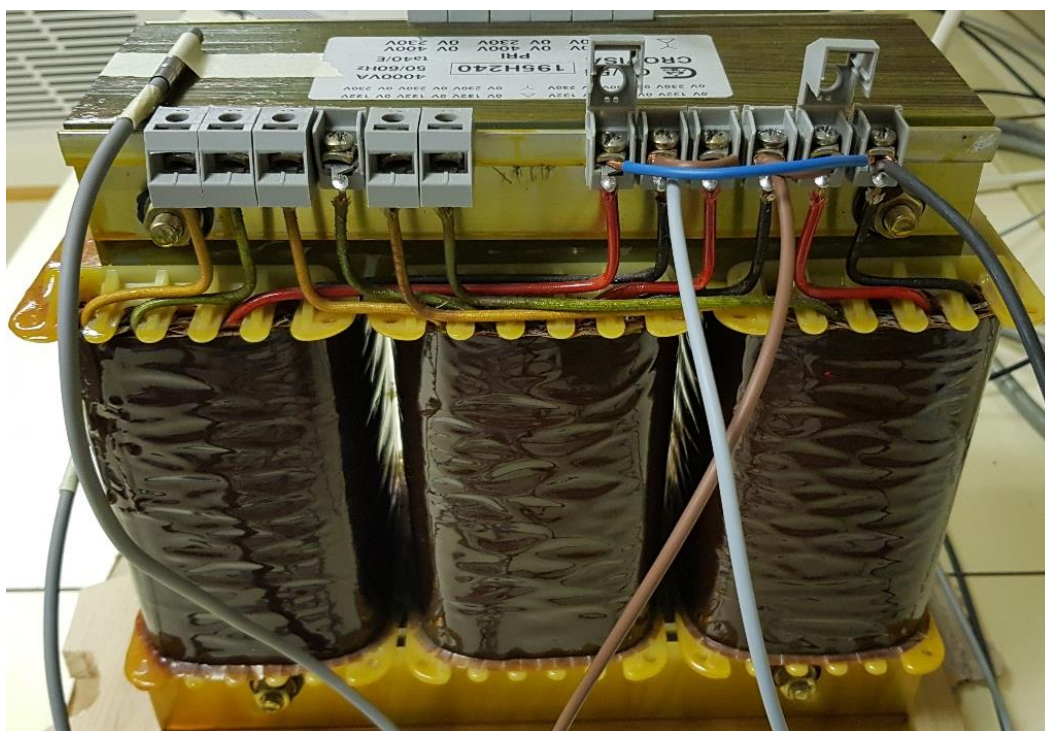


Figura 21 Conexiones para el lado de baja tensión en vacío. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

En esta imagen, **Figura 21**, se observa la conexión a la que están sometidos los devanados secundarios. Se puede apreciar que es la misma que en el lado de alta tensión, por tanto, una conexión en triángulo.

En la siguiente tabla, **Tabla 1**, y sus correspondientes gráficos, **Figura 22**, **Figura 23** se pueden ver los resultados obtenidos en cuanto a tensiones y corrientes en los devanados de la máquina.

Devanados	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Tensiones	228,5	228,5	228,5	136,5	136,5	136,5	136,5	136,5	136,5
Corrientes	0,491	0,372	0,363	0	0	0	0	0	0

Tabla 1. Resultados de tensiones y corrientes para la bancada en Vacío. (Elaboración propia). [22]

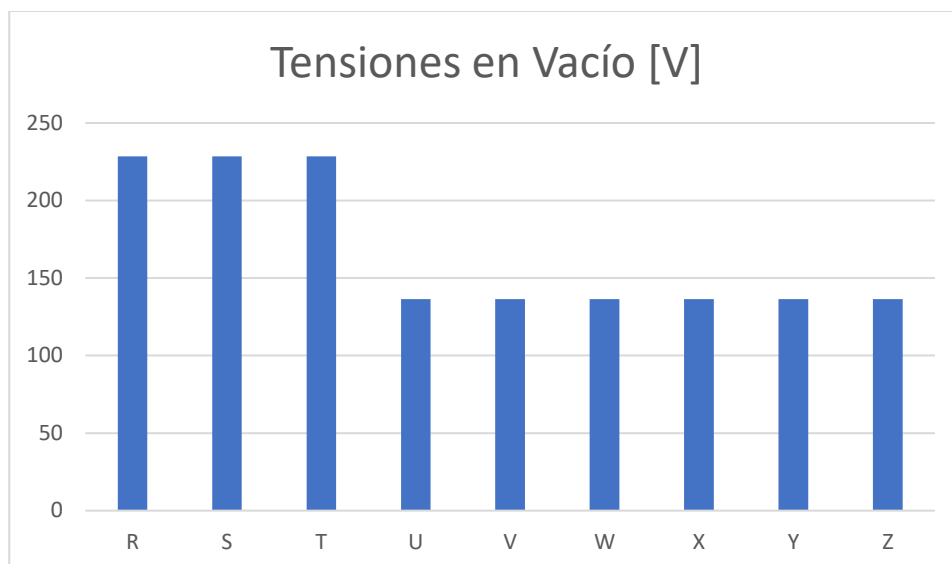


Figura 22 Gráfico de tensiones para la bancada en Vacío. (Elaboración propia) [22]

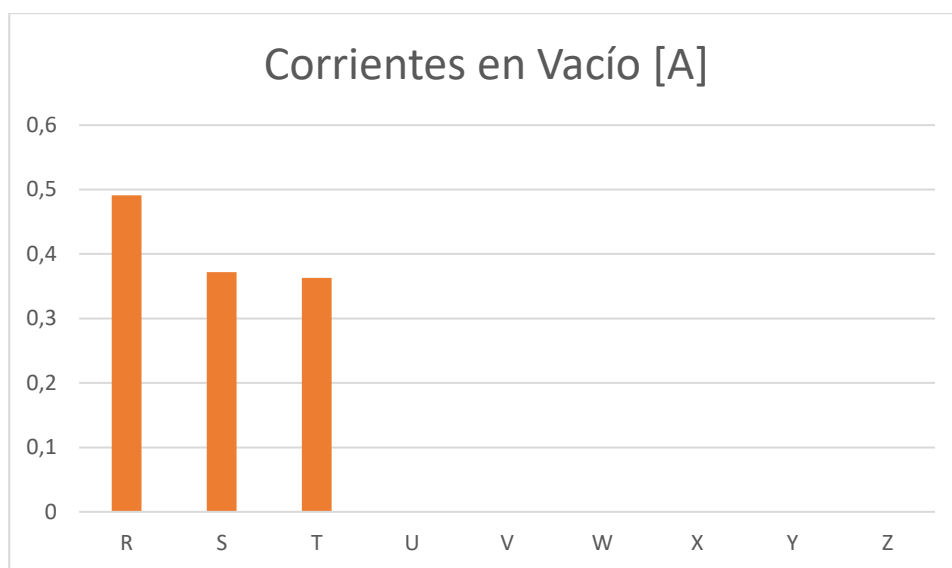


Figura 23 Gráfico de corrientes para la bancada en Vacío. (Elaboración propia) [22]

Los resultados de pérdidas en el cobre y pérdidas en el núcleo magnético se muestran en el siguiente gráfico, **Figura 24** .

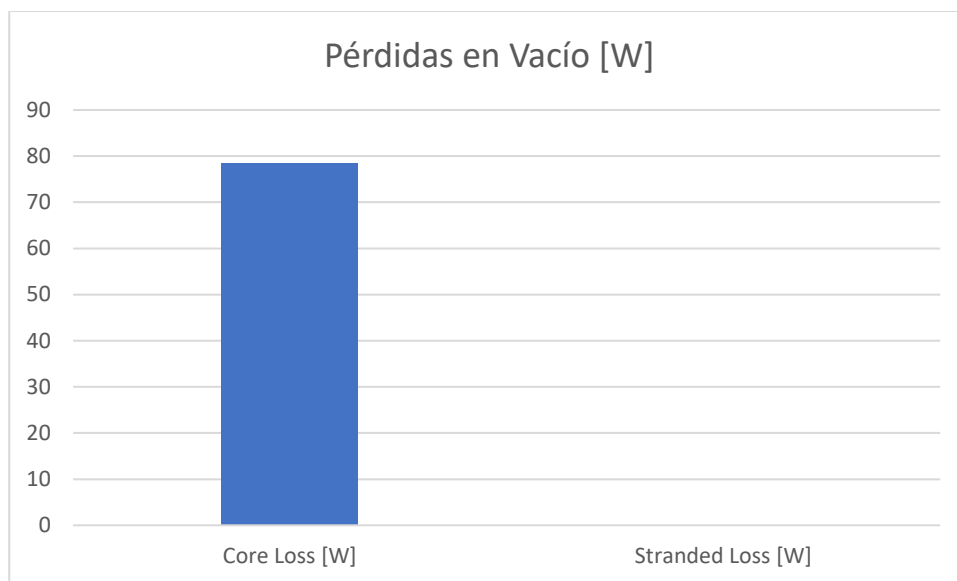


Figura 24 Resultados de pérdidas de la bancada en Vacío. (Elaboración propia) [22]

Como se vio en la parte teórica, el ensayo de vacío muestra las pérdidas en el núcleo magnético o “Core Losses”, en este caso alcanzan un valor de **78’4 W**.

7.1.2 Ensayo de Cortocircuito.

Una vez visto el ensayo de vacío, le sigue el ensayo de cortocircuito. Este ensayo consistirá en cortocircuitar las salidas del devanado secundario a estudiar, es decir, conectar a través de un cable los 3 bornes del devanado, tratándose de un cortocircuito trifásico equilibrado. Vemos las características del ensayo más en detalle a continuación.

En este ensayo existe una limitación a la hora de realizarse y se tiene que ver con la intensidad que va a circular por los devanados. Por las características técnicas de nuestra fuente de alimentación, no será posible realizar un ensayo de cortocircuito para las condiciones nominales de falta. Esto quiere decir que se buscará un valor de intensidad que no perjudique nuestros elementos del sistema.

Para ello se representa la siguiente ecuación de la **Fórmula 8**, que se corresponde con la ecuación de la potencia de la máquina eléctrica y servirá para calcular la intensidad nominal de cortocircuito en los devanados primarios.

$$St = 3 * Vf * If$$

Fórmula 8. Ecuación de la potencia aparente en función de los valores de fase.

Siendo ***St*** la potencia aparente total de la máquina en VA (Voltioamperios), ***Vf*** la tensión de fase en V (Voltios) e ***If*** la corriente de fase en A (Amperios).

Se ve que el valor de la corriente de falta cuando se está trabajando en condiciones nominales, es decir para una tensión de fase de **230 V**, es de **5'7 A**.

Lo que se hizo para establecer una corriente de falta adecuada a nuestro sistema previniendo daños a nuestras máquinas se detalla a continuación. Con las conexiones realizadas para un cortocircuito trifásico en el lado de baja tensión, se comenzó a suministrar tensión en los devanados primarios. Esta tensión fue aumentada lentamente. A medida que se aumentaba el valor de entrada de tensión en los devanados, se dejaba estabilizar el fallo de cortocircuito durante unos segundos para ver cómo se comportaba la fuente de tensión. Una vez alcanzado el valor de **5 A** en cada una de las ramas del circuito primario, se observó como la fuente de tensión comenzaba a verse forzada. Se podía apreciar una vibración acompañada de un ruido que incrementaba su intensidad con respecto a valores de corriente probados anteriormente. Por tanto, y con la intención de no causar daños a la fuente, se decidió establecer la corriente de estudio para nuestro ensayo en **5 A**.

A continuación, en las imágenes **Figura 25** , **Figura 26** , **Figura 27** se ven las características de las ondas estudiadas.



Figura 25 Valores de la fuente para el ensayo de Cortocircuito. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).



Figura 26 Representación valores ensayo de Cortocircuito. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

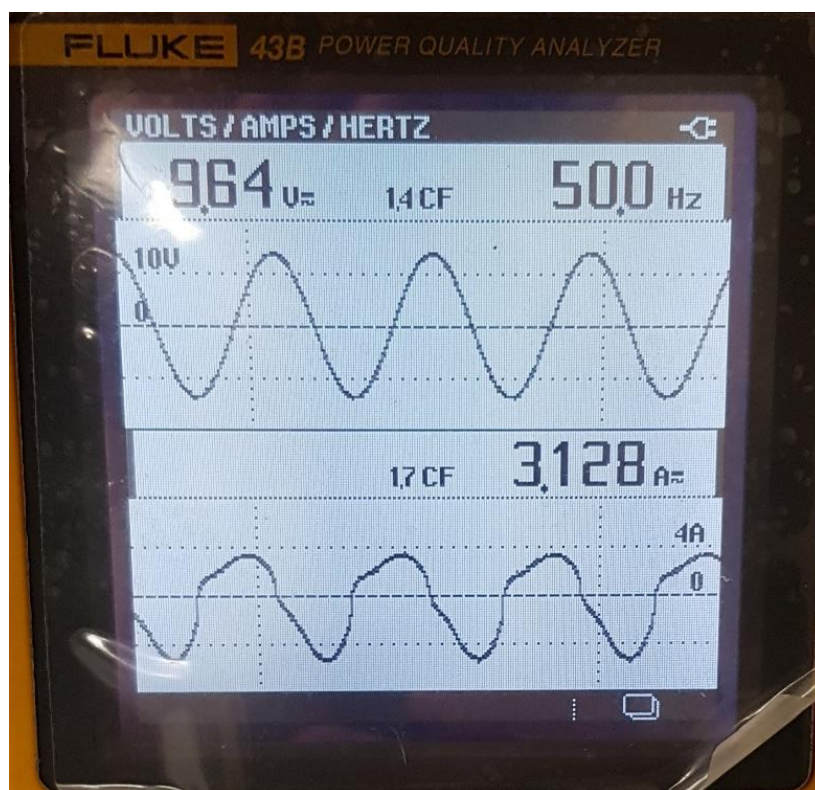


Figura 27 Datos del "Fluke" en Cortocircuito. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

Si se observa el conexionado de cables para nuestro ensayo de Cortocircuito en las **Figura 28** y **Figura 29**, se ve la correspondencia con el **Plano 3**. En el lado de alta tensión se ha realizado una conexión en estrella, conectando las salidas de los devanados “R” y “T” a la salida del devanado “S”. Mientras, en el devanado secundario, al tratarse de un cortocircuito, se ha hecho lo mismo con las entradas que con las salidas. Es decir, se han conexionado en estrella de la misma manera comentada para el lado de alta tensión. Entradas de los devanados “U” y “W” conectadas con la entrada del devanado “V”, y salidas de los mismos devanados han sido conectadas entre sí formando un cortocircuito trifásico.

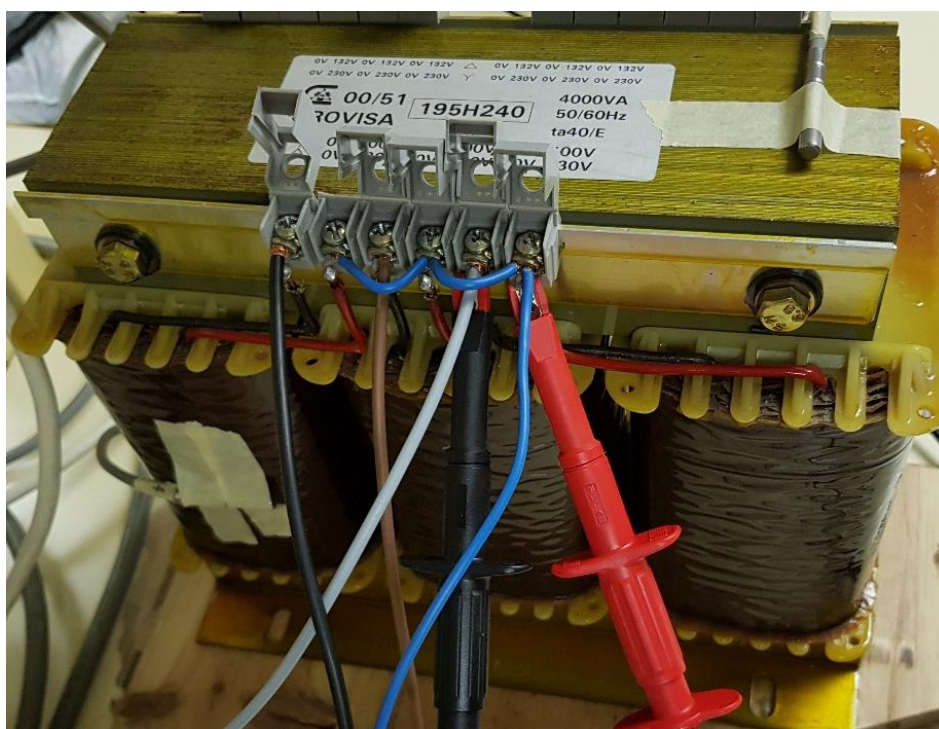


Figura 28 Conexiones para el lado de alta tensión en Cortocircuito. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

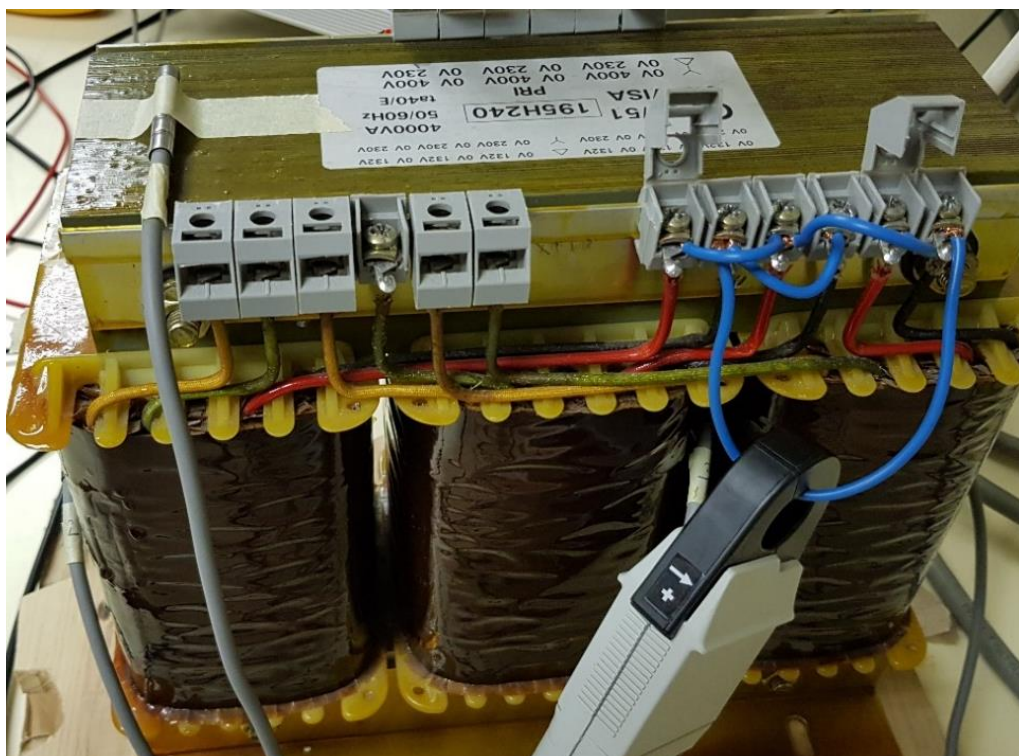
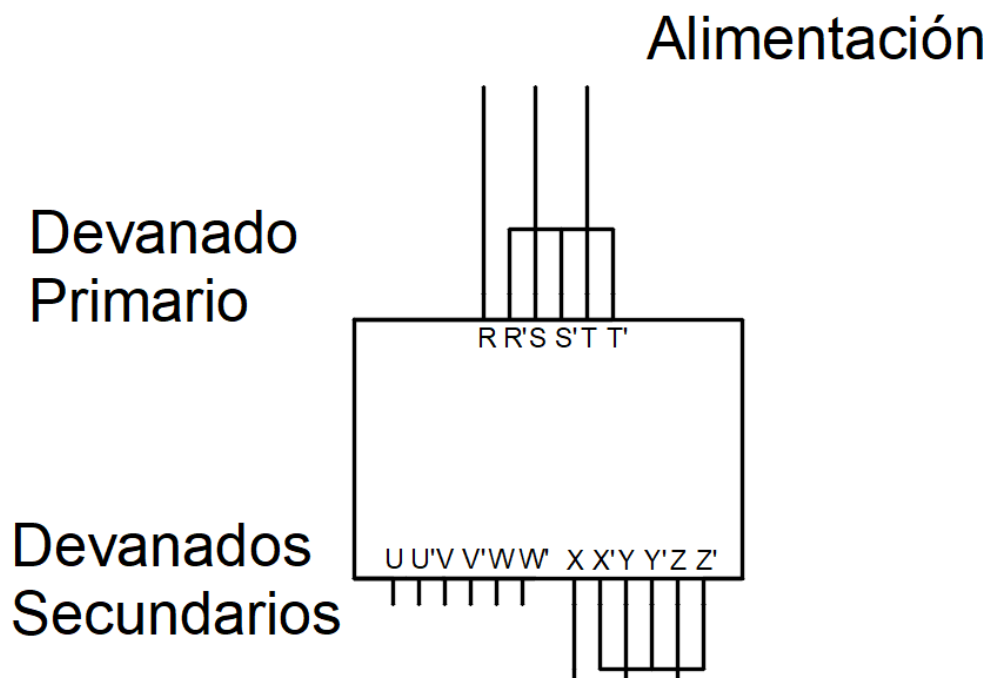


Figura 29 Conexiones para el lado de baja tensión en Cortocircuito. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).



Plano 3 Esquema de conexiones del transformador para el ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [20]

En la siguiente tabla, **Tabla 2** y sus correspondientes gráficos, **Figura 30**, **Figura 31** se ven los resultados obtenidos en cuanto a tensiones y corrientes en los devanados de la máquina como las pérdidas obtenidas en los mismos, además de las pérdidas en el núcleo magnético.

Devanados	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Tensiones	9,5	8,2	8,6	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74
Corrientes	5	5	5	8,14	8,14	8,14	0	0	0

Tabla 2. Resultados de tensiones y corrientes para la bancada en Cortocircuito.
(Elaboración propia). [22]

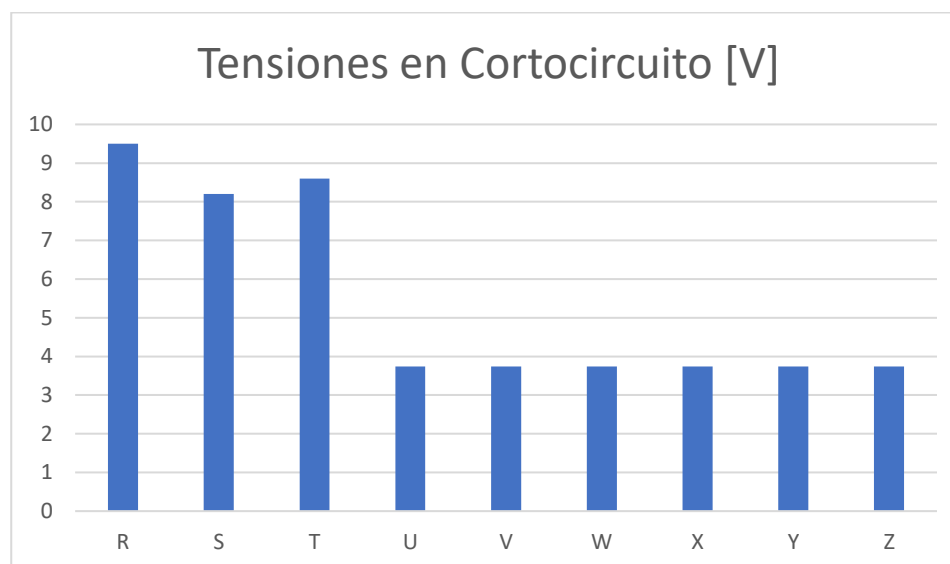


Figura 30 Gráfico de tensiones para la bancada en Cortocircuito. (Elaboración propia) [22]

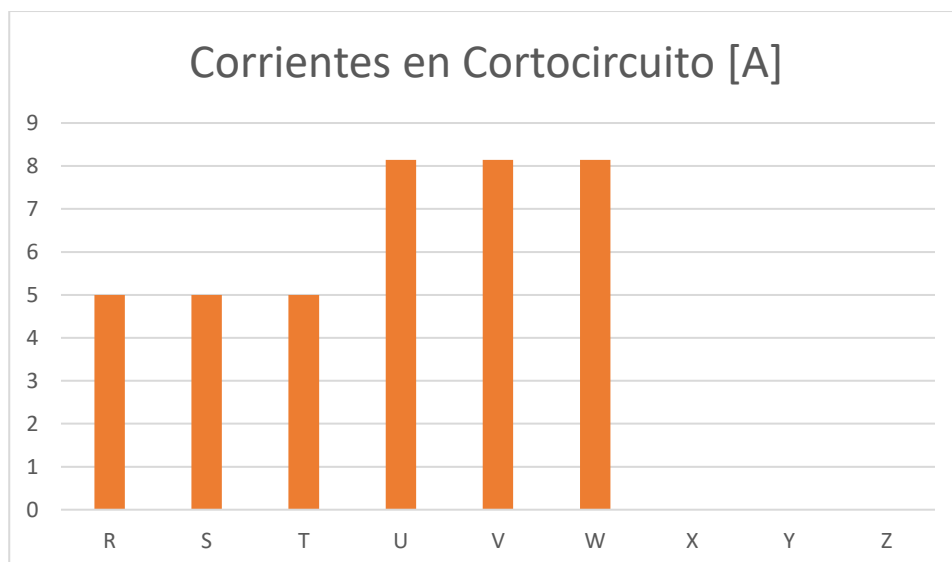


Figura 31 Gráfico de corrientes para la bancada en Cortocircuito. (Elaboración propia) [22]

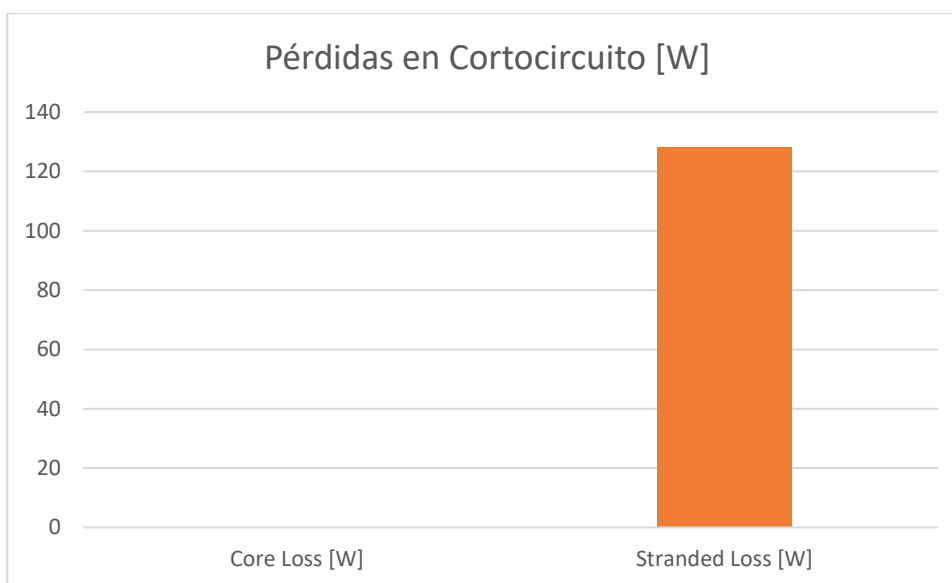


Figura 32 Resultados de pérdidas de la bancada en Cortocircuito. (Elaboración propia) [22]

En la **Figura 32**, se pueden observar los resultados de pérdidas. Como se vio en la parte teórica, el ensayo de cortocircuito muestra el valor de las pérdidas en los devanados, siendo su valor en este ensayo de **128.1 W**.

En la **Figura 33**, se ve la fotografía final de la bancada de ensayos para nuestro ensayo de cortocircuito.

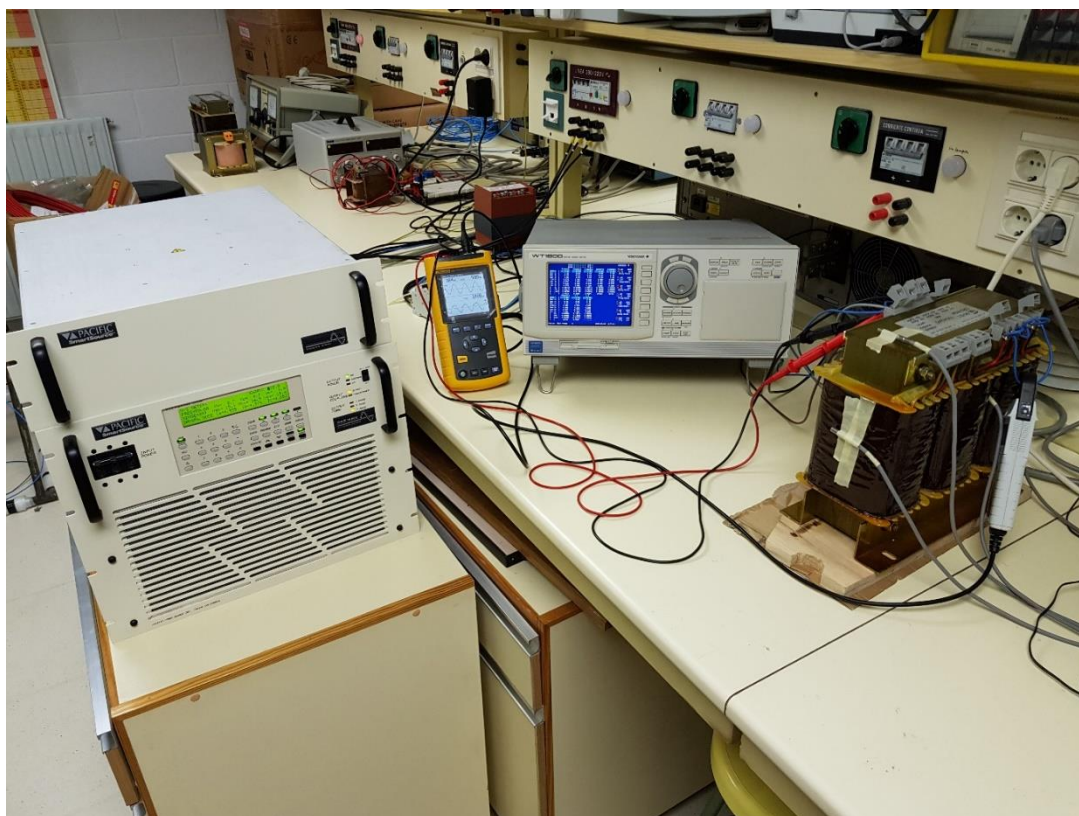


Figura 33 **2ª Imagen de la bancada de ensayos para Cortocircuito. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).**

7.1.3 Ensayo de Carga.

El ensayo de carga es el último de los 3 que se van a realizar, y las características en cuanto a la alimentación de la máquina y las conexiones internas de los devanados realizadas, serán exactamente iguales que para el ensayo de Vacío. Como se vio en el apartado de tipología de ensayos, ahora sí existirá una carga a la que suministrar energía, por tanto, las conexiones de las salidas de los devanados secundarios de la máquina no estarán en circuito abierto, siendo esta la diferencia que se encuentra con el ensayo de vacío.

En la **Figura 34** se ve la carga trifásica utilizada para realizar el ensayo de carga. Podemos ver el margen de tensión que nos ofrece, situándose de **220 V** a **380 V** para una potencia máxima de **2000 W**. Aquí se ve una limitación a la hora de realizar nuestro ensayo, ya que la máquina trifásica tiene su potencia nominal establecida en **4000 VA**.

Por esta razón, para prevenir posibles daños en la carga trifásica se elegirán valores de alimentación suministrados por la fuente que vayan acorde. Esto quiere decir que no se utilizarán los valores nominales de tensión del transformador para el estudio. Esta limitación también será contemplada a la hora de realizar las simulaciones en el programa “ANSYS”.

Los valores de resistencia elegidos para esta prueba de carga se pueden ver en la 0:

	Valor en Ohmios [Ω]
Resistencia de Carga 1	77'3
Resistencia de Carga 2	75'5
Resistencia de Carga 3	80'3

Tabla 3. Tabla de Resistencias de carga. (Elaboración propia). [23]

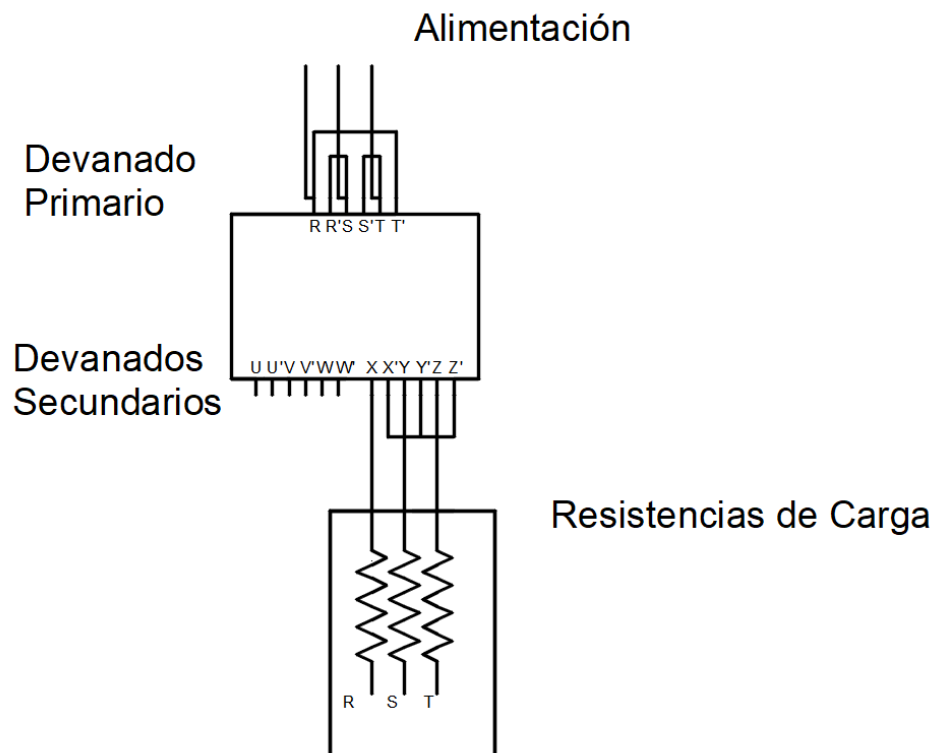
Estos valores permiten mantenerse dentro de un margen de seguridad establecido, con el cual se asegura un correcto funcionamiento de nuestro sistema además de prevenir posibles daños a la carga.



Figura 34 Carga trifásica. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

En el **Plano 4** se ven las conexiones realizadas para este ensayo en las salidas de los devanados secundarios, además, estará acompañado de las imágenes reales tomadas en la bancada de ensayos, **Figura 35 y Figura 36**.

Si se enlazan las conexiones visualmente, se ve que las cargas van conectadas en serie con nuestros devanados secundarios, y es en sus salidas donde se establece el neutro ficticio.



Plano 4 Esquema de conexiones del transformador para el ensayo de Carga.
(Elaboración propia). [20]



Figura 35 Conexiones para el lado de alta tensión en Carga. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

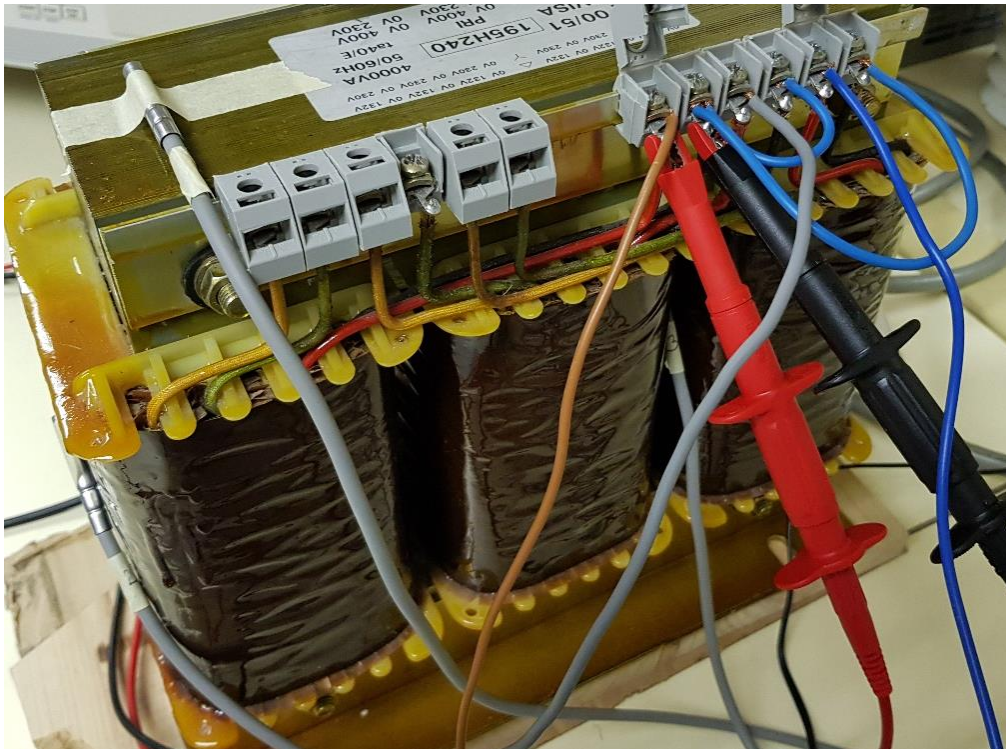


Figura 36 Conexiones para el lado de baja tensión en Carga. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

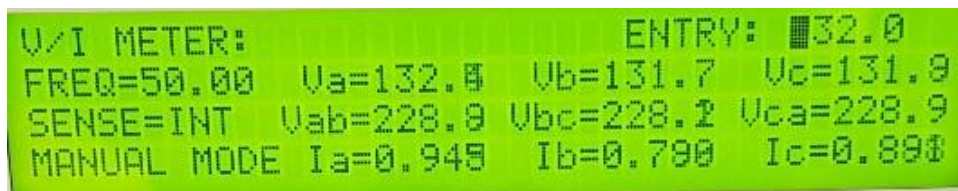


Figura 37 Valores de la fuente para el ensayo de Carga. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

En la **Figura 37** se pueden ver los valores de tensión y corriente suministrados por la fuente de alimentación a nuestro devanado primario del transformador, estos serán utilizados para elaborar un gráfico datos.

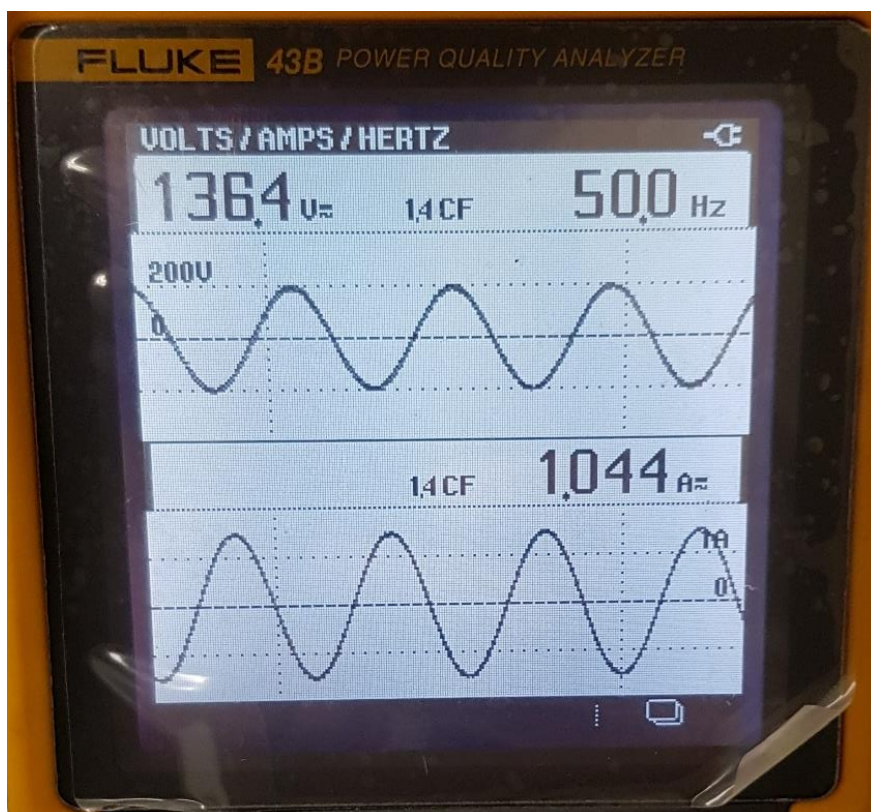


Figura 38 Valores del “Fluke” en Carga. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

Gracias a los resultados tomados para los devanados secundarios con la ayuda del “Fluke” como se ve en la imagen de la **Figura 38**, se pueden representar los resultados, para posteriormente ser contrastados con los de la simulación que se realizará.

En la siguiente tabla, **Tabla 4** y sus correspondientes gráficos, **Figura 39**, **Figura 40** se ven los resultados obtenidos en cuanto a tensiones y corrientes en los devanados de la máquina como las pérdidas obtenidas en los mismos, además de las pérdidas en el núcleo magnético.

Devanados	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Tensiones	229	229	229	136,5	136,5	136,5	136,5	136,5	136,5
Corrientes	0,94	0,81	0,87	1,01	1,01	1,01	0	0	0

Tabla 4. Resultados de tensiones y corrientes para la bancada en Carga. (Elaboración propia). [22]

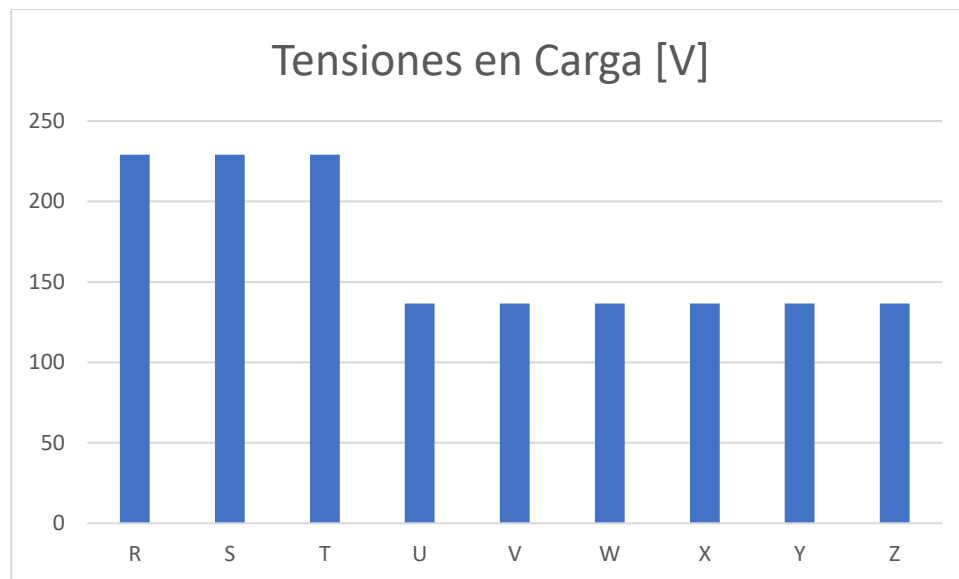


Figura 39 Gráfico de tensiones para la bancada en Carga. (Elaboración propia) [22]

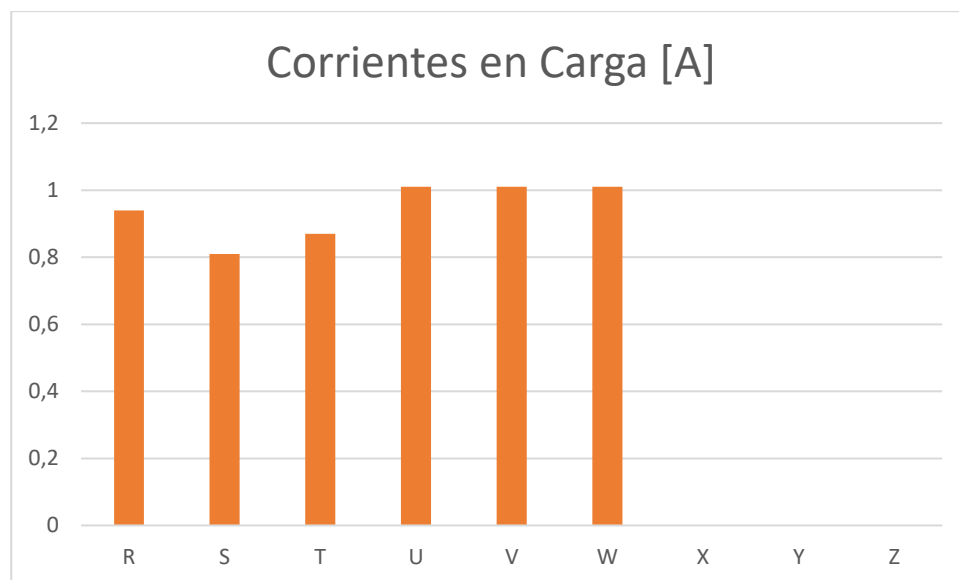


Figura 40 Gráfico de corrientes para la bancada en Carga. (Elaboración propia) [22]

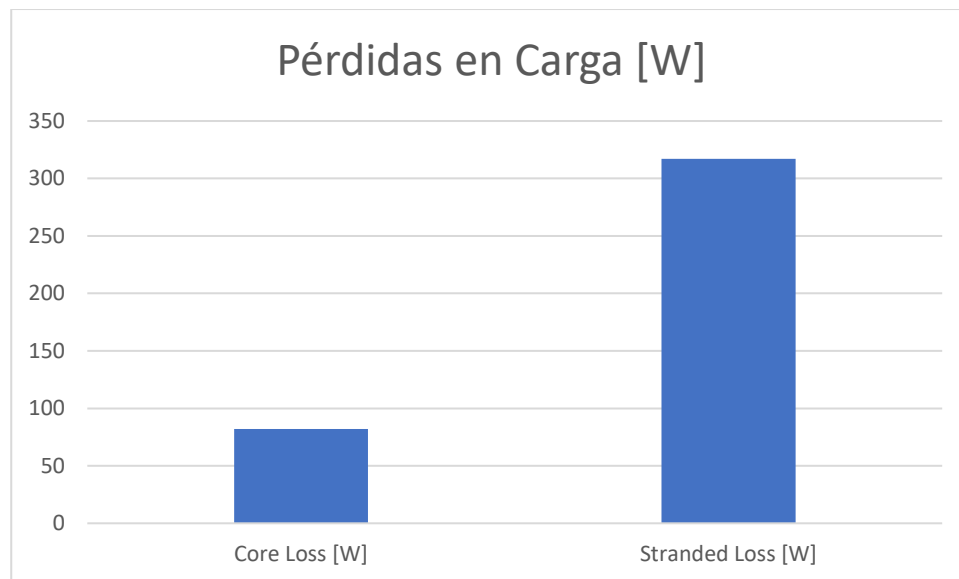


Figura 41 Resultados de pérdidas de la bancada en Carga. (Elaboración propia) [22]

Se observan los resultados de las pérdidas en carga en la **Figura 41**.

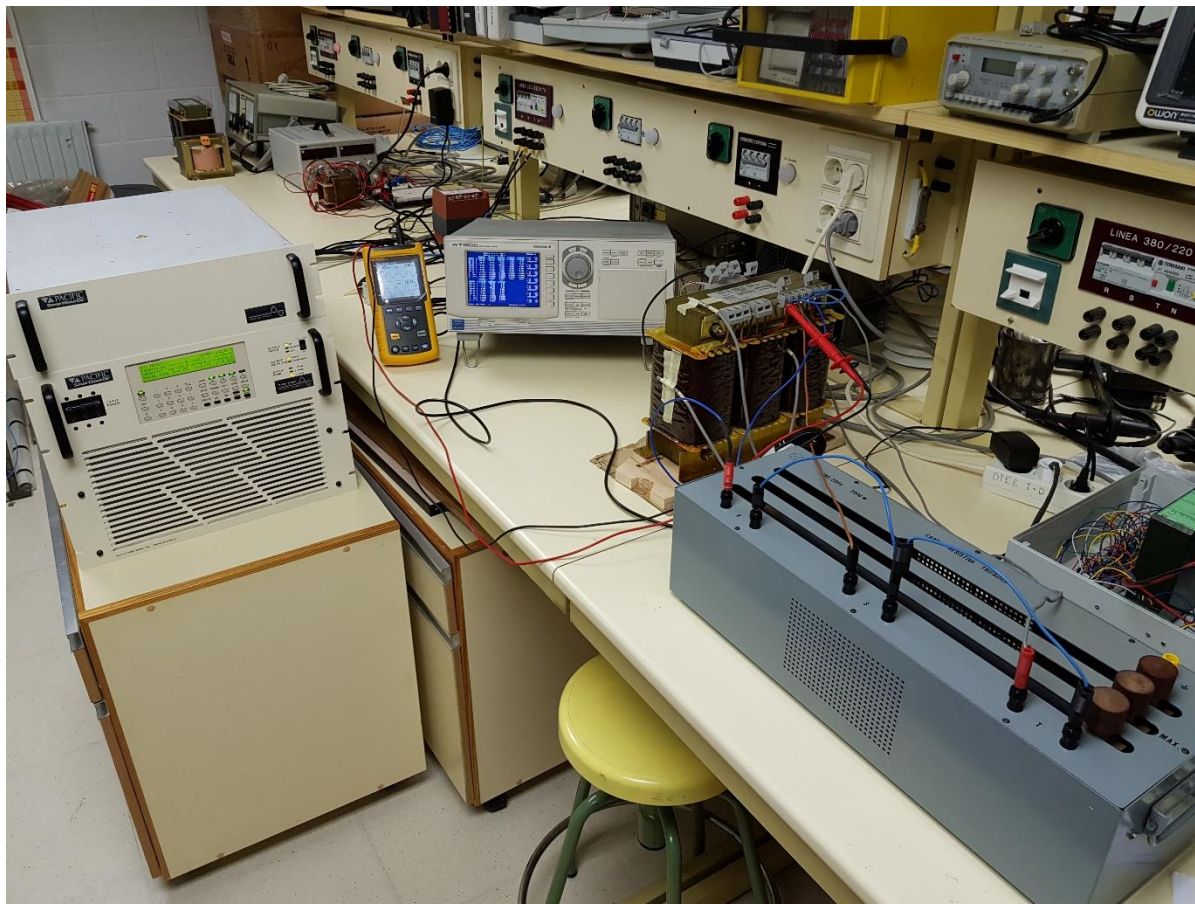


Figura 42 3ª Imagen de la bancada para el ensayo de Carga. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

En esta última fotografía, **Figura 42**, se ve la bancada de ensayos completa sobre la que se ha realizado el ensayo final, es decir, el ensayo de carga.

7.2 Ensayo Térmico.

Una vez visto el ensayo electromagnético, se procede con el ensayo térmico. También estará documentado y las explicaciones irán acompañadas de imágenes para un mejor entendimiento del proceso.

Para la realización de los ensayos se usarán unas sondas de temperatura con las que se podrán tomar las mediciones de temperatura pertinentes en cada ensayo. Serán utilizadas 4 sondas, como será definido en los ensayos realizados. Estos ensayos tendrán una duración de media hora cada uno, tiempo estimado como suficiente para el estudio que se quiere realizar.

Es importante comentar, que en los ensayos térmicos que se van a realizar, no se producen variaciones a nivel de circuitos eléctricos conectados. Por tanto, la alimentación, conexiones internas y externas de la máquina serán completamente idénticas a las utilizadas en los ensayos eléctricos. Como añadido, y sin el cual no podría realizarse esta prueba, se fijarán en los lugares correspondientes las sondas de temperatura mencionadas.

Para seguir el mismo esquema que en el estudio eléctrico, se comienza con el ensayo de Vacío.

7.2.1 Vacío.

Se utilizarán 4 sondas, 2 de ellas serán realmente necesarias para el estudio ya que se puede dividir nuestro transformador en dos zonas físicas completamente distintas, como son los arrollamientos y el núcleo ferromagnético. Además, se usarán otras 2 sondas para asegurarse de que las mediciones de temperatura en los devanados son correctamente contrastadas. Estas sondas son denominadas **PT100. [21]**

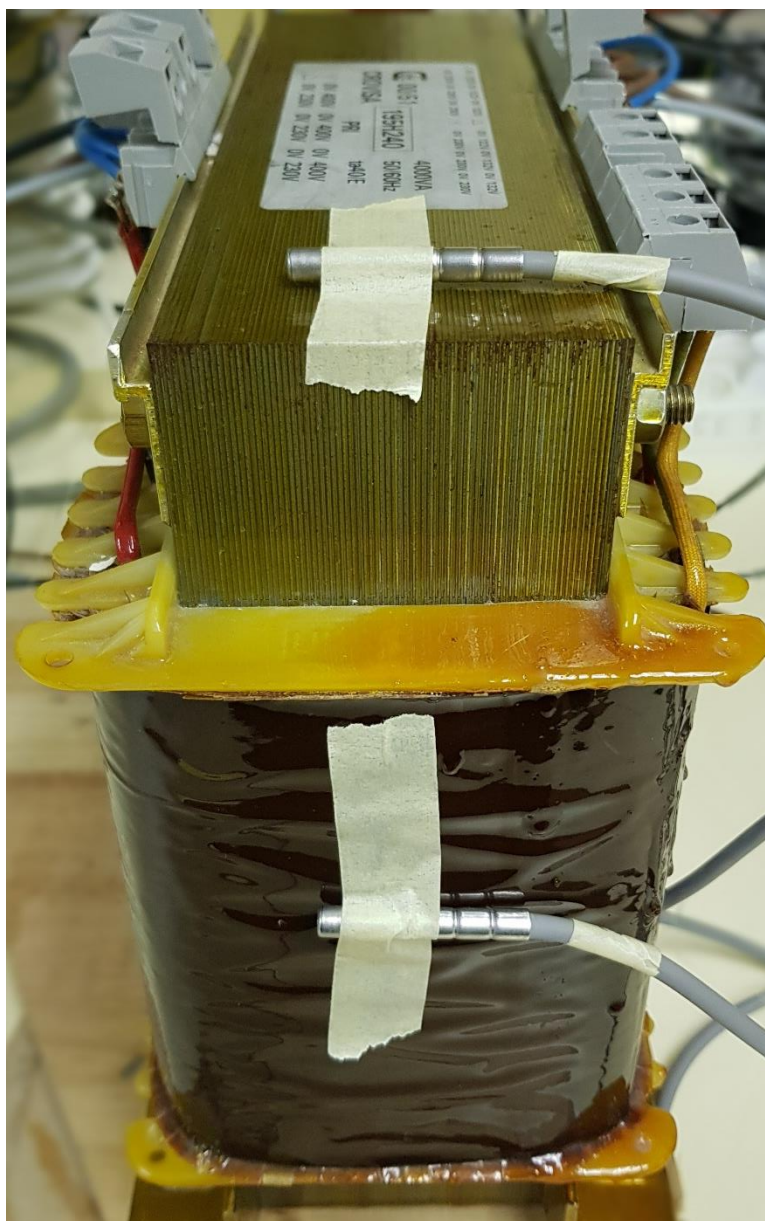


Figura 43 Vista de perfil de la colocación de las sondas PT100. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

Se puede ver reflejada en la imagen de la **Figura 43**, la colocación de las sondas primera y segunda en nuestro transformador, la primera de ellas se corresponde con la sonda fijada al núcleo del transformador y la segunda está pegada a la parte correspondiente a los devanados de la máquina.

Quedan representados los valores iniciales de temperatura en la **Tabla 5**.

	Valor en grados centígrados [°C]
Temperatura de la sonda PT100 1	23
Temperatura de la sonda PT100 2	23
Temperatura de la sonda PT100 3	23
Temperatura de la sonda PT100 4	23

Tabla 5. Tabla de temperaturas iniciales para el ensayo de Vacío. (Elaboración propia).

[23]

Al finalizar el ensayo, es decir, unos 30 minutos después los datos obtenidos fueron los representados en la **Tabla 6**.

	Valor en grados centígrados [°C]
Temperatura de la sonda PT100 1	29'32
Temperatura de la sonda PT100 2	24'62
Temperatura de la sonda PT100 3	25'26
Temperatura de la sonda PT100 4	24'33

Tabla 6. Tabla de temperaturas finales para el ensayo de Vacío. (Elaboración propia).

[23]

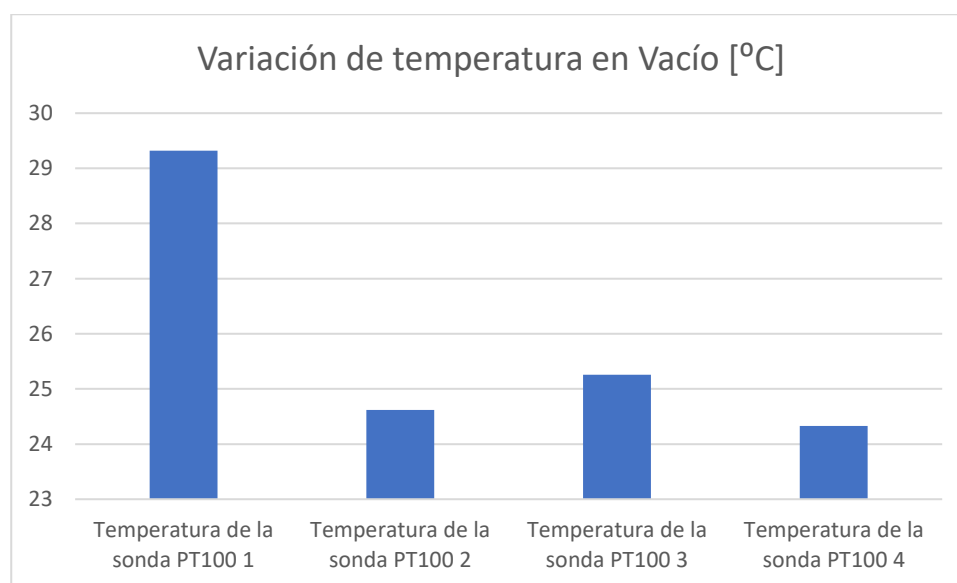


Figura 44 Gráfico de temperaturas para el ensayo de Vacío. (Elaboración propia) [22]

Se puede observar en la **Figura 44**, cual ha sido la variación de temperatura obtenida. Como era de esperar, al tratarse del ensayo de Vacío, el mayor incremento de temperatura ha sido registrado por la sonda número 1 que se corresponde con el núcleo ferromagnético, como se ha podido ver en las tablas.

7.2.2 Cortocircuito.

Al igual que para el ensayo de Vacío se ilustrarán los valores iniciales de temperatura y los valores obtenidos después del ensayo mediante el uso de dos tablas, en este caso, **Tabla 7** y **Tabla 8**.

	Valor en grados centígrados [°C]
Temperatura de la sonda PT100 1	23
Temperatura de la sonda PT100 2	23
Temperatura de la sonda PT100 3	23
Temperatura de la sonda PT100 4	23

Tabla 7. Tabla de temperaturas finales para el ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [23]

	Valor en grados centígrados [°C]
Temperatura de la sonda PT100 1	23'54
Temperatura de la sonda PT100 2	28'23
Temperatura de la sonda PT100 3	31'15
Temperatura de la sonda PT100 4	28'52

Tabla 8. Tabla de temperaturas finales para el ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [23]

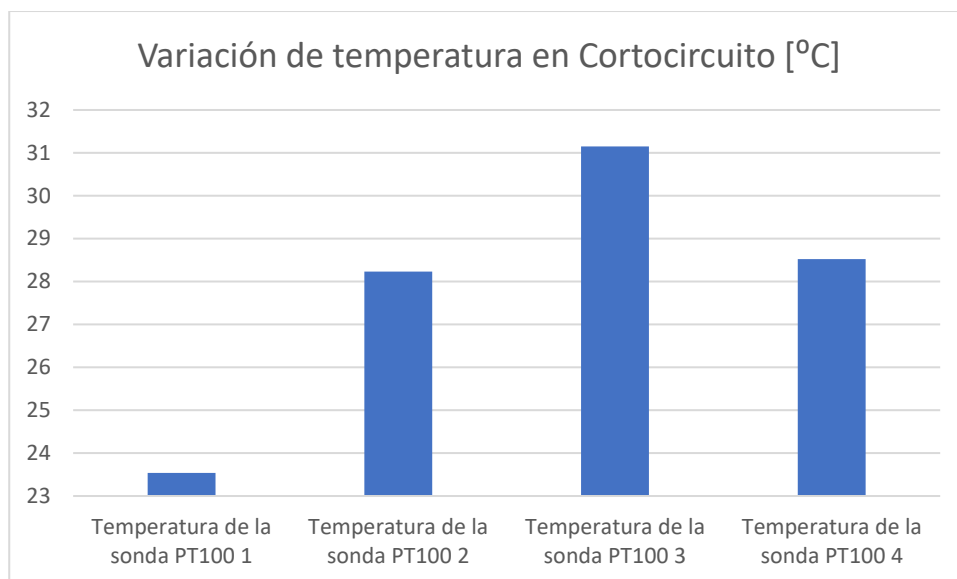


Figura 45 Gráfico de temperaturas para el ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [22]

En la **Figura 45**, se pueden analizar visualmente los resultados obtenidos en cuanto a temperatura, lógicamente las mayores variaciones se encuentran en los devanados, al tratarse del ensayo de cortocircuito, en concreto para la sonda número 3.

7.2.3 Carga.

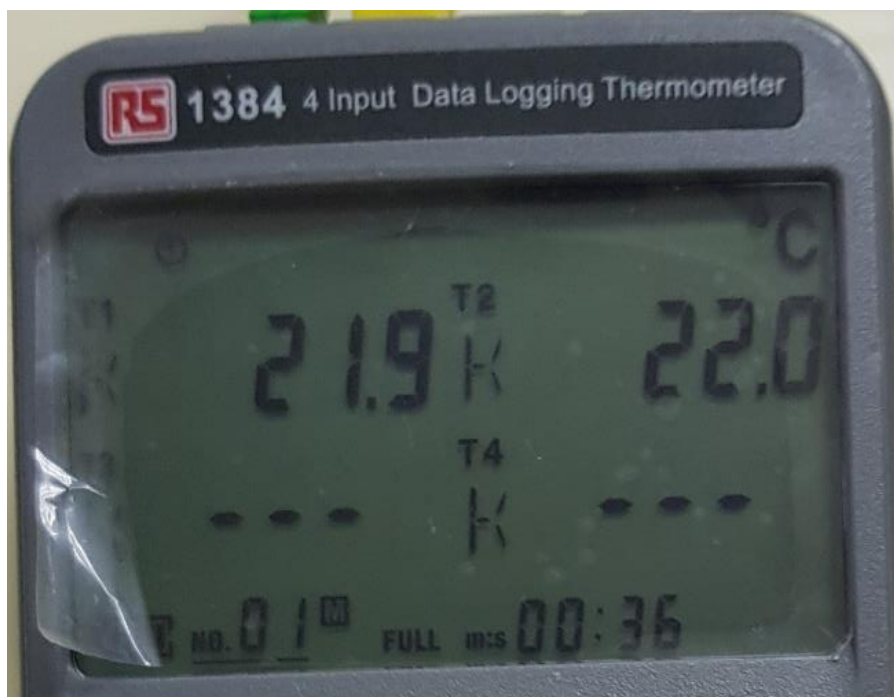


Figura 46 Termómetro digital. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

En la **Figura 46** se puede ver un termómetro digital que tiene conectado una pequeña sonda para medir la temperatura. Fue utilizado para establecer la temperatura ambiente a la que se realizó el ensayo de carga. Al terminar con el ensayo de cortocircuito, el transformador eléctrico no recuperó una temperatura natural de reposo y se tuvo que realizar el ensayo de carga partiendo de unos valores de temperatura algo más elevados que en condiciones de reposo.

La temperatura ambiente en el momento de iniciar con el estudio de carga se estableció en torno a los **22** grados centígrados. Por tanto, se tienen los valores de temperatura que nos muestran las sondas **PT100** al inicio de nuestro ensayo de carga y con los datos obtenidos una vez finalizado el ensayo, se puede calcular la variación de temperatura correspondiente de haber sido realizado bajo unas condiciones de reposo.

Se establece el punto de referencia de temperatura en los **22 °C**, **Tabla 9** y se le suma la variación obtenida en el ensayo. Se ven los resultados en la **Tabla 10**.

	Valor en grados centígrados [°C]
Temperatura de la sonda PT100 1	22
Temperatura de la sonda PT100 2	22
Temperatura de la sonda PT100 3	22
Temperatura de la sonda PT100 4	22

Tabla 9. Tabla de temperaturas finales para el ensayo de Carga. (Elaboración propia).

[23]

	Valor en grados centígrados [°C]
Temperatura de la sonda PT100 1	27'43
Temperatura de la sonda PT100 2	24'51
Temperatura de la sonda PT100 3	25'44
Temperatura de la sonda PT100 4	24'51

Tabla 10. Tabla de temperaturas finales para el ensayo de Carga. (Elaboración propia).

[23]

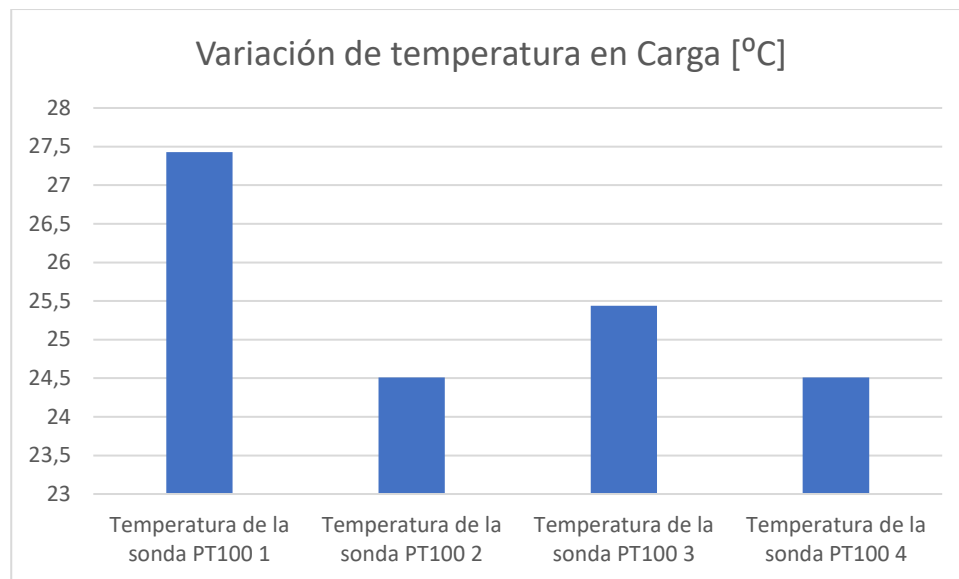


Figura 47 Gráfico de temperaturas para el ensayo de Carga. (Elaboración propia). [22]

Analizando visualmente los datos de temperatura obtenidos para el ensayo de carga en la **Figura 47**, se ve que la mayor variación de temperatura se produce en el núcleo magnético.

8 Caracterización y Simulación.

Tal y como quedó definida en los objetivos del proyecto, se va a realizar una simulación de un transformador trifásico de 4000 VA. Esta simulación estará dividida principalmente en dos partes, la primera de ellas se centrará en las características eléctricas de la máquina, y la segunda estará enfocada en un ensayo temperatura.

Dentro del ensayo eléctrico se diferenciarán 3 casos de estudio: Vacío, Cortocircuito y Carga. Estos casos de estudio son los que se realizan normalmente para determinar las características de toda máquina eléctrica. A su vez, el ensayo térmico estará dividido de igual manera ya que las variaciones de temperatura afectarán en determinadas zonas para los diferentes ensayos.

Se utilizará la ayuda del desarrollador informático ANSYS [24]. En concreto su software “MAXWELL 2D” [25], con el que se podrá representar nuestro transformador y posteriormente realizar las simulaciones eléctricas pertinentes. También se usará el software “TRANSIENT THERMAL” [26], para realizar los 3 estudios térmicos, que serán de tipo transitorio. De esta manera se observará la evolución que tiene la temperatura en el transcurso de los estudios.

Una vez explicado el proceso a seguir, ahora se realizará un seguimiento detallado de todos los pasos dados en el desarrollo de este trabajo de fin de grado, ayudándose de fotografías que irán documentando todo el progreso para un mejor entendimiento. Esta manera de detallar el proceso podrá ser utilizada como herramienta de estudio y aprendizaje en lo que se refiere a la simulación con el software de ANSYS, ya que se irán explicando los pasos a seguir en las simulaciones realizadas.

Antes de comenzar, se justifica la elección de un sistema en dos dimensiones y no tres. Al no interesar en este proyecto, un estudio mecánico exhaustivo, la complejidad que tiene una simulación en tres dimensiones no es conveniente, ya que en lo que respecta a los estudios eléctrico y térmico, no es necesario. Por esta razón, y estando preparado el programa para la realización de estos ensayos en un sistema en dos dimensiones, se eligió este sistema.

8.1 Maxwell 2D. Ensayo Eléctrico.

La solución por la que se va a optar en nuestra simulación se ve en la **Figura 48** :

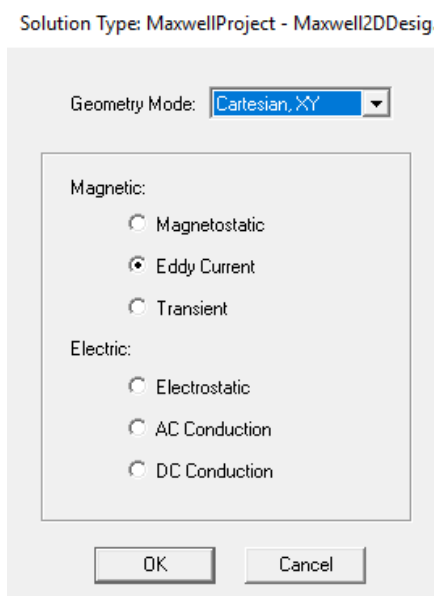
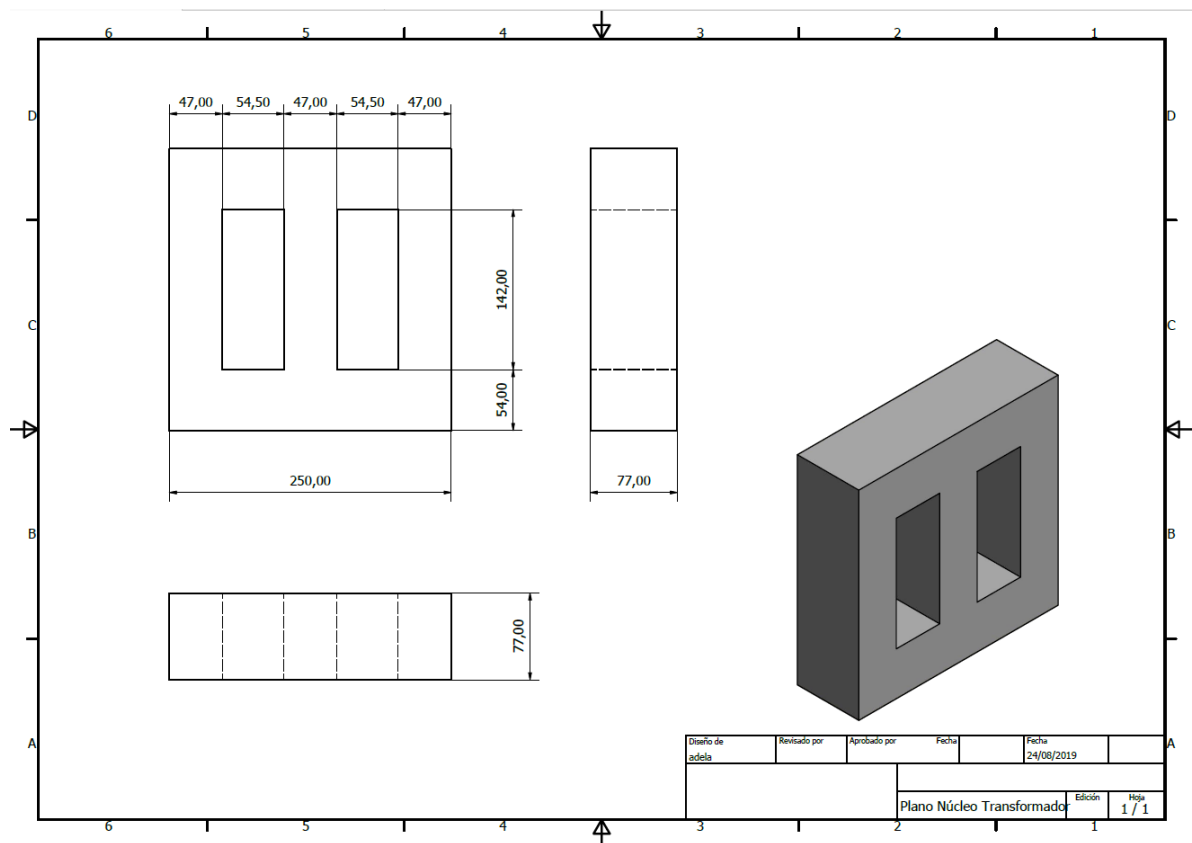


Figura 48 **Solution Type. (Elaboración propia). [25]**

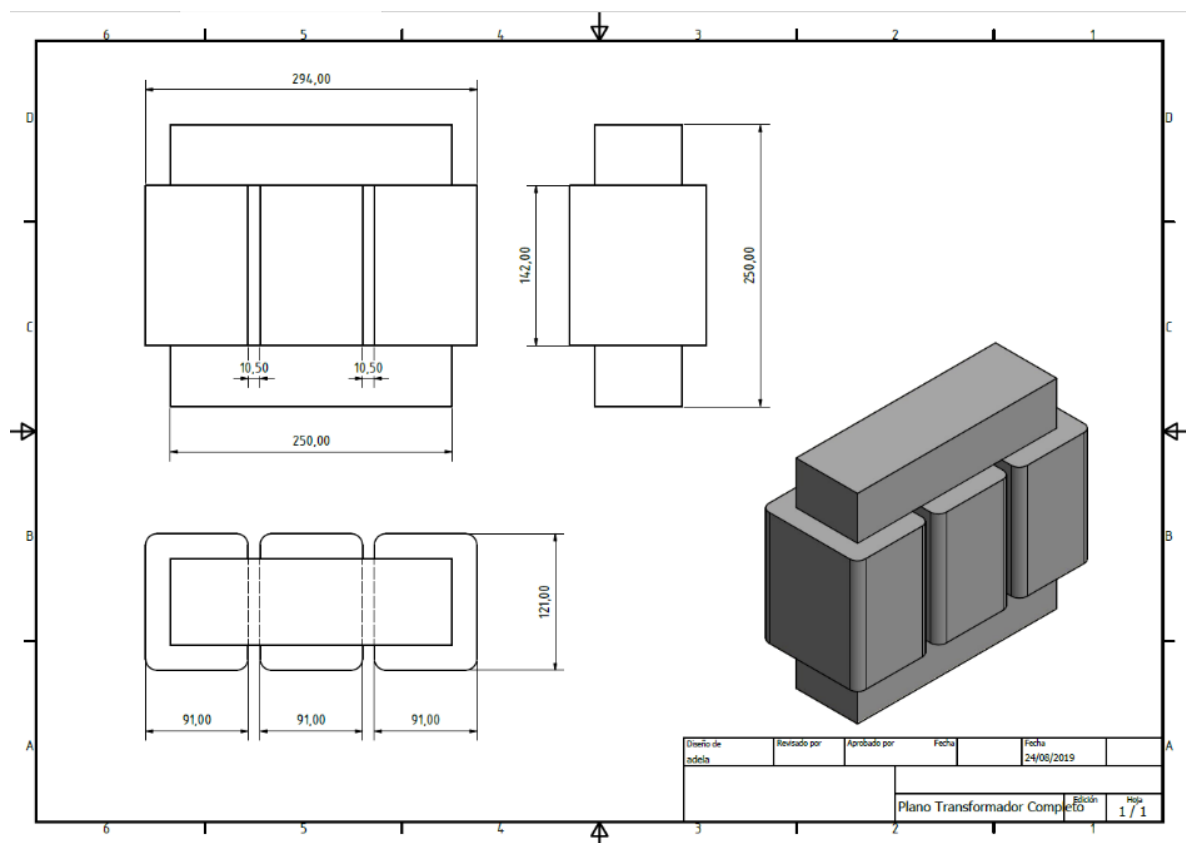
Los datos en cuanto a dimensiones del transformador serán recogidos de forma cartesiana, y el tipo de solución será “Eddy Current”, lo que permitirá obtener las pérdidas energéticas de la máquina, una vez realizado el estudio eléctrico.

8.1.1 Geometría.

Para empezar, se tomarán medidas al transformador. Se necesitarán las dimensiones tanto de la chapa ferromagnética como de los devanados. Se usará la ayuda de un calibre para conseguir una medición lo más precisa posible, de esta manera las variaciones que se obtengan en la simulación del modelo serán mínimas. En los planos **Plano 5** y **Plano 6** quedan representadas las dimensiones que se introducirán en el programa ANSYS.



Plano 5 Núcleo del transformador. (Elaboración propia). [27]



Plano 6 Transformador completo. (Elaboración propia). [27]

Se realizará la geometría del transformador, lo cual se puede hacer tanto en un proyecto de geometría independiente o directamente en el software "MAXWELL 2D". Optando por esta segunda opción no se tendrán que importar después la geometría en el proyecto.

Una vez aportadas las dimensiones del transformador se procede a asignarle sus propiedades físicas.

8.1.2 Mallado.

Se optará por un mallado estándar, ya que el estudio eléctrico no requerirá de un número concreto de elementos finitos. Como se puede ver en la imagen de la **Figura 49**, se trata de un mallado triangular muy utilizado en este tipo de ensayos. Se puede apreciar como la densidad de la malla se hace mayor en las zonas críticas de la geometría, como son las esquinas de las ranuras del núcleo magnético.

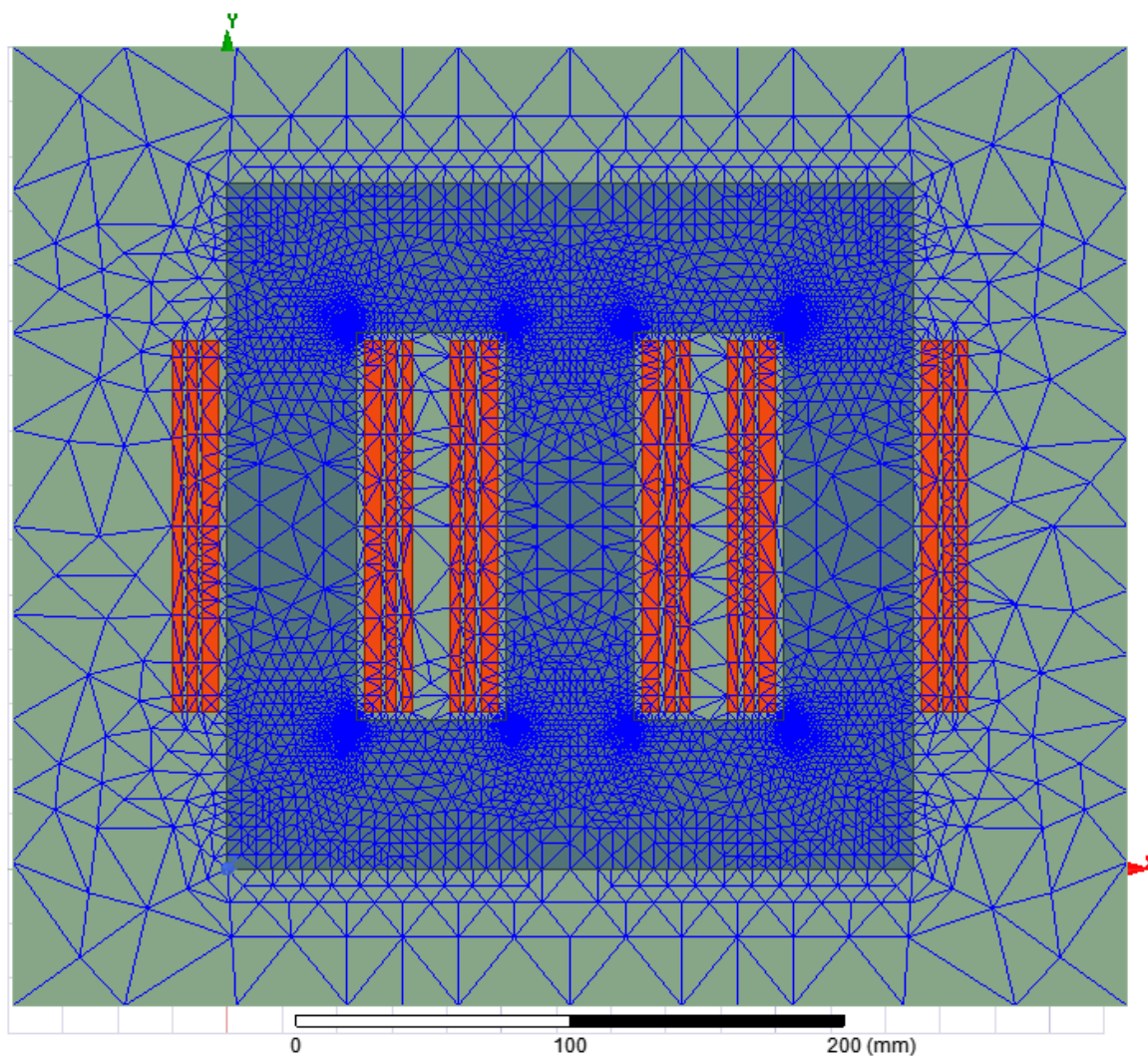


Figura 49 Estructura del mallado para el estudio eléctrico. (Elaboración propia mediante el software Maxwell 2D). [25]

8.1.3 Materiales.

Primero se añaden los materiales de los que se compone, que en este caso son dos: uno para la chapa de material ferromagnético y otro para las bobinas de cobre. En el caso de las bobinas se utiliza el material “copper” que se corresponde con el cobre, pero en el caso de la chapa hay que introducir unas características específicas, por tanto, lo mejor es crear un nuevo material. Una vez creado se introduce la curva de magnetización característica de una chapa **M400-50A**, que es la que corresponde, según los datos que se tienen del transformador. Sin embargo, más adelante se verá la necesidad de emplear una chapa **M600-50A** para hacer coincidir los resultados obtenidos en la bancada de ensayos y así, poder validar el modelo. Además, se tiene que introducir otra curva característica como es la de pérdidas en el hierro, así como los valores de frecuencia, conductividad y grosor. Con todo, se obtienen los valores de las constantes “Kh”, “Kc” y “Ke” y el material quedará definido.

En la siguiente **Figura 50**, se puede ver su tabla de características, en ella quedan reflejados los valores de las constantes comentadas, además de los valores de permitividad y permeabilidad, para la cual se introducirá su curva de magnetización.

View / Edit Material

Material Name: DW360_50 Material Coordinate System Type: Cartesian

Name	Type	Value	Units
Relative Permittivity	Simple	1	
Relative Permeability	Nonlinear	B-H Curve...	
Bulk Conductivity	Simple	0.01	siemens/m
Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
Magnetic Loss Tangent	Simple	0	
Core Loss Model		Electrical Steel	w/m ³
- Kh	Simple	188.391884175324	
- Kc	Simple	1.37077838890311	
- Ke	Simple	15.6484217609481	
Mass Density	Simple	7650	kg/m ³
Composition		Solid	

Notes: [Text Field] [...]

Calculate Properties for: [Dropdown]

Buttons: [Reset] [OK] [Cancel] [Validate Material]

View/Edit Material for:

- ☒ Active Design
- ☐ Active Project
- ☐ All Properties

Physics:

- ☒ Electromagnetic
- ☐ Thermal
- ☐ Structural

View/Edit Modifier for:

- ☐ Thermal Modifier

Material Appearance:

- ☐ Use Material Appearance

Color: [Field]

Transparency: [Field]

Figura 50 **Tabla de Características del material. (Elaboración propia). [25]**

En la **Figura 51** se puede la curva característica del material, en la que se enfrentan la inducción magnética con la intensidad del campo magnético. Para la obtención de esta curva habrá que buscar el catálogo correspondiente a la chapa magnética que se va a utilizar e introducir la tabla de datos correspondiente a esas dos magnitudes.

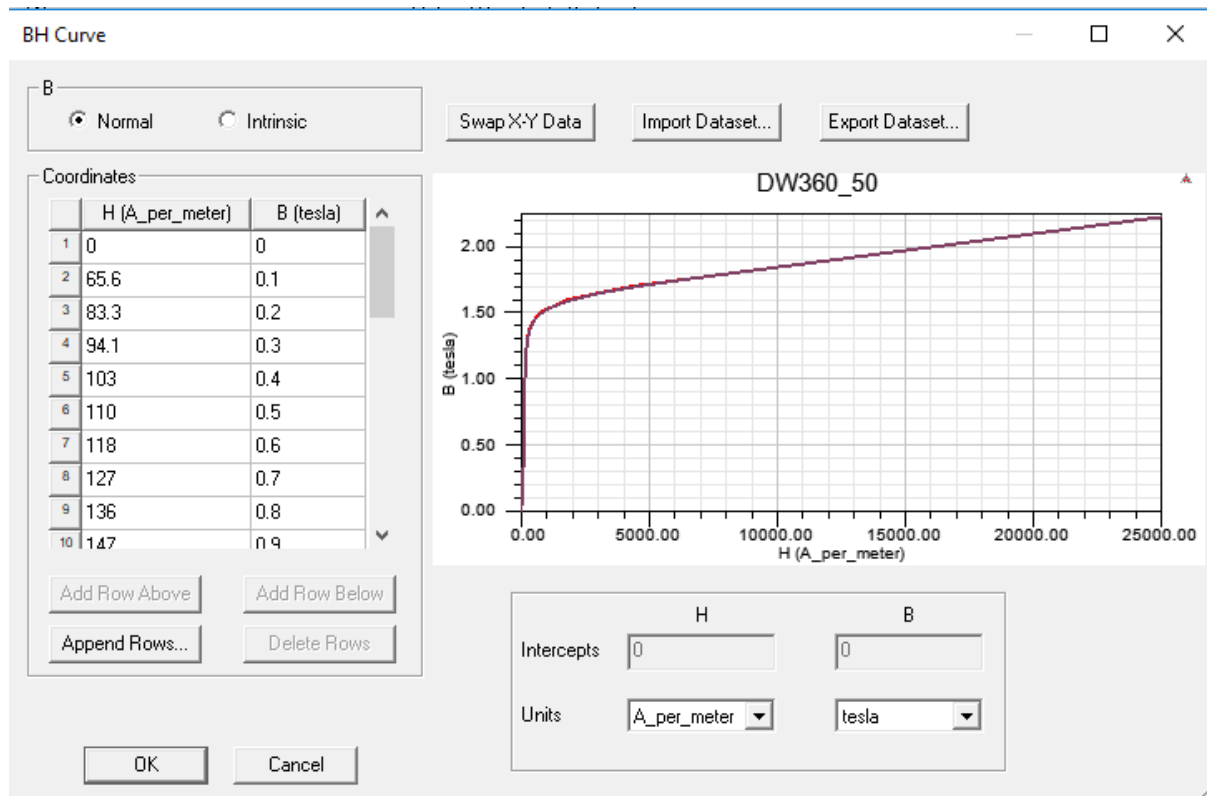


Figura 51 Tabla de propiedades del material. (Elaboración propia). [25]

Por último, se debe introducir la curva de pérdidas del material, la cual se obtendrá también del catálogo de la chapa magnética M600-50^a. Esta curva varía en función de la frecuencia de trabajo, siendo el caso para una frecuencia de **50 Hz**, **Figura 52**.

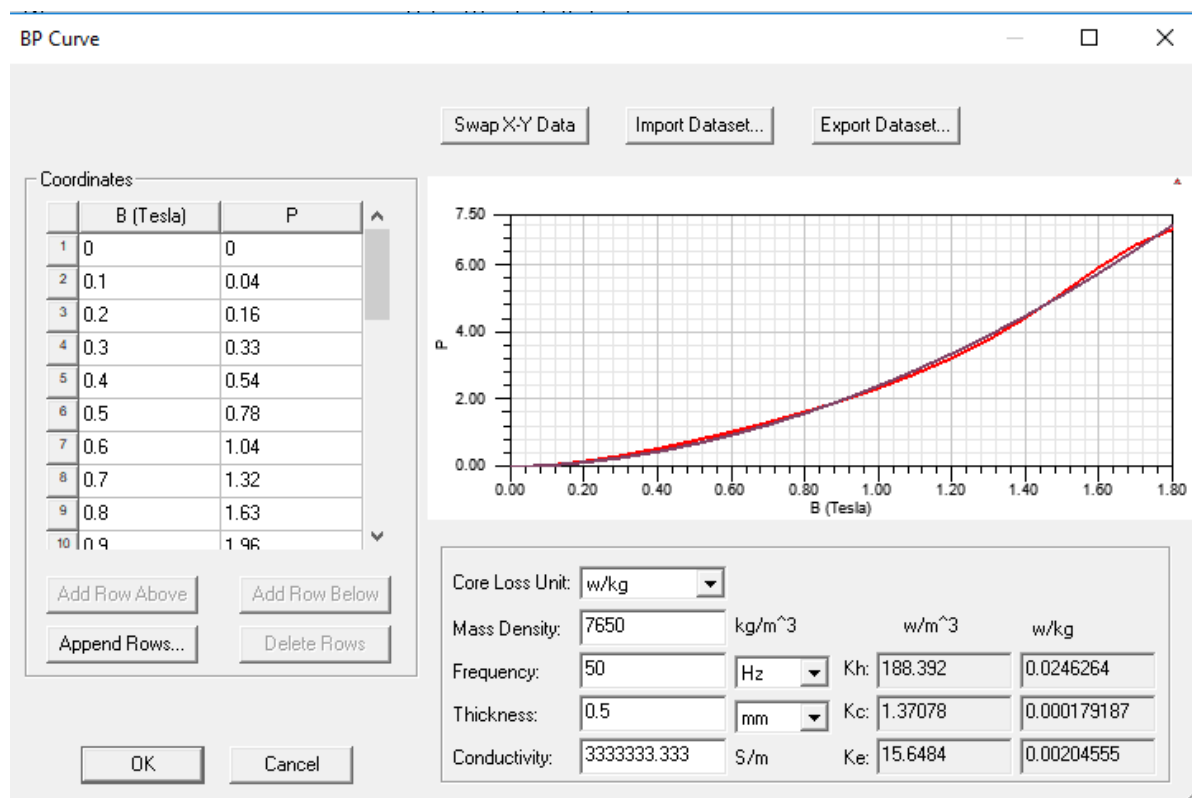


Figura 52 Curva de pérdidas en el hierro para una frecuencia de 50 Hz.
(Elaboración propia). [25]

En cuanto a los devanados del transformador a estudiar, aún queda saber el número de espiras que tiene cada uno y también su resistencia. Para ello será necesario medirlo en el laboratorio. Se utilizará un multímetro para obtener los valores de las resistencias, se irá conectando en los distintos bornes de cada devanado, obteniendo así unos valores aproximados de 0.5 ohmios para los primarios y 0.45 ohmios para los secundarios.

El cálculo de las espiras de los devanados se realizará en el apartado **13 Anexo cálculo de espiras del transformador**.

Esta es la geometría del transformador representada en “MAXWELL 2D”, **Figura 53** :

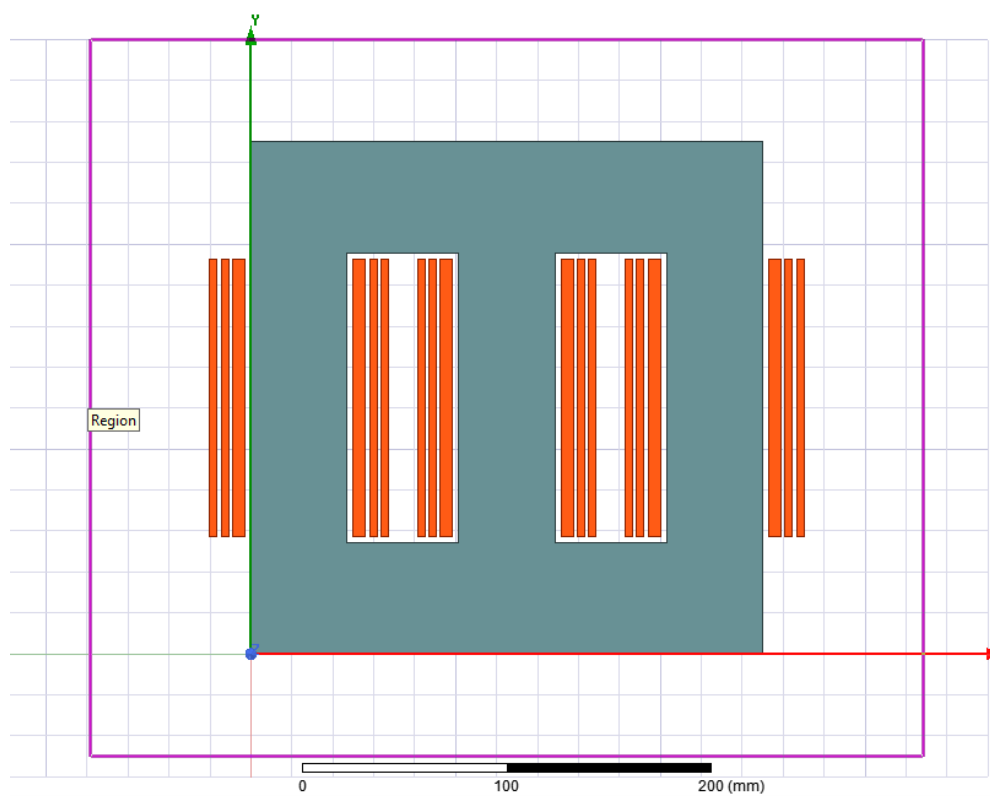


Figura 53 Geometría del transformador. (Elaboración propia). [25]

Teniendo las características físicas del transformador determinadas, se puede pasar a determinar las características eléctricas del mismo. Éstas no van a ser fijas, puesto que variarán dependiendo del ensayo que se esté realizando. Al definir los devanados primarios y secundarios, agrupando dentro de cada uno las geometrías correspondientes, como se puede ver en la **Figura 54** , también hay que atribuirles la característica “Type: External”, ya que esto permitirá usar los devanados en circuitos externos para poder conectarse de maneras determinadas y hacer posibles los estudios.

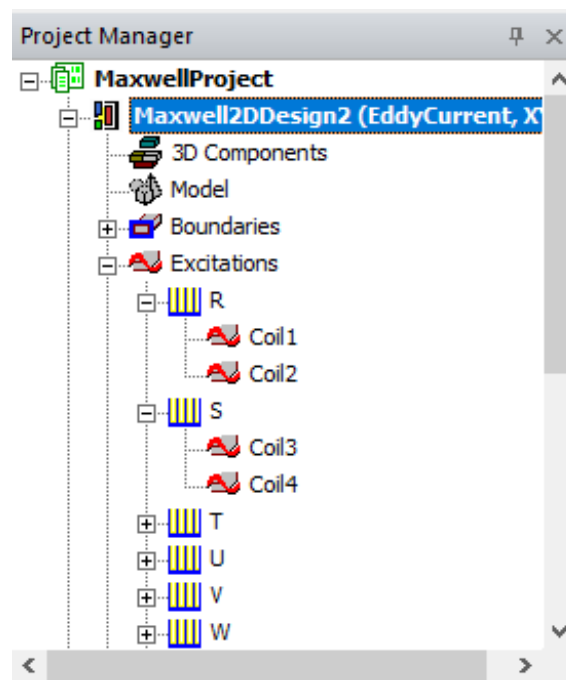


Figura 54 Excitations, Estructura de los devanados. (Elaboración propia). [25]

Una vez introducida la parte mecánica de la máquina, y teniendo el modo de operación del programa correctamente establecido, se puede dividir la simulación en los tres ensayos definidos anteriormente en la organización: El ensayo de vacío, el ensayo de cortocircuito y el ensayo de carga.

8.1.4 Ensayo de Vacío.

En esta primera imagen, **Figura 55**, se puede observar la interfaz que va a tener el banco de trabajo, aquí quedan representados los ensayos que se han realizado, así como el software del programa utilizado.

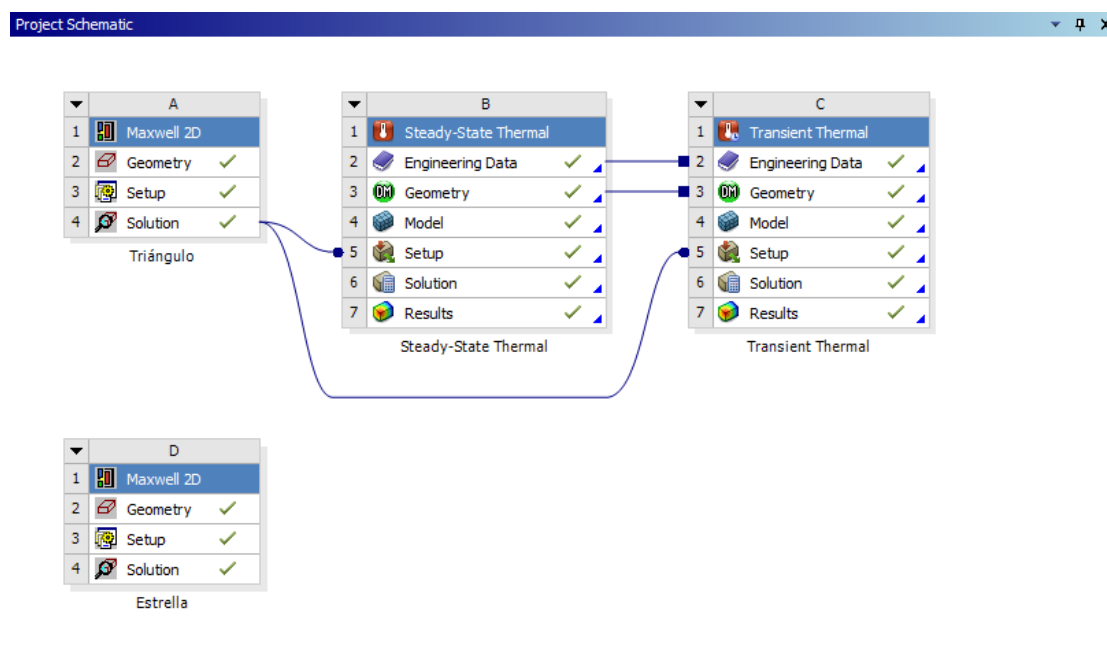


Figura 55 Banco de trabajo en ANSYS. (Elaboración propia). [25]

Se observa que se han realizado dos ensayos, uno con los devanados primarios conectados en estrella y otro con los devanados conectados en triángulo. El ensayo térmico solo está realizado para la conexión en triángulo al igual que en la bancada de ensayos.

Ahora también se puede ver en esta pantalla, que aparecen dos tipos de ensayos térmicos, el “STEADY-STATE” o estado estable, y el “TRANSIENT” o transitorio. Como se comentó anteriormente, no interesa el ensayo transitorio, ya que se quiere ver cómo se comporta la máquina con el paso del tiempo.

Se ven las conexiones del circuito externo utilizado en la siguiente fotografía, **Figura 56**.

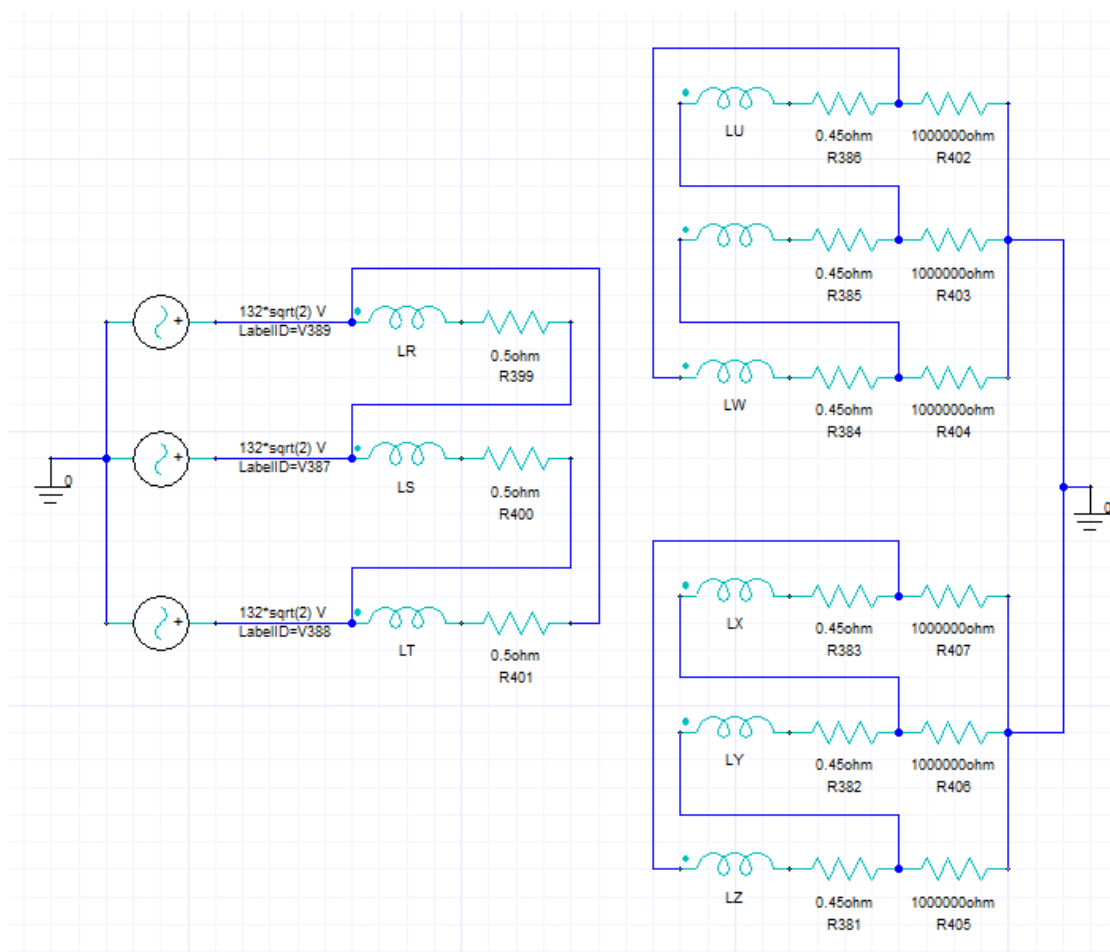


Figura 56 Circuito de conexiones para el ensayo de Vacío. (Elaboración propia mediante el programa Ansys). [25]

Hay que matizar algunos aspectos de este circuito. Primero, se cuenta con tres fuentes de tensión alterna, de la misma magnitud, pero con distinta fase. Están desfasadas entre sí 120° , formando un sistema trifásico equilibrado. Se puede observar que su valor es de 132 V y está multiplicado por $\sqrt{2}$ dadas las condiciones del programa, que pide que se introduzca su valor de pico para un correcto cálculo del circuito. También se puede ver los devanados del transformador, representados por inductancias. “R”, “S” y “T” constituyen los arrollamientos primarios, “U”, “V” y “W” una de las salidas secundarias y “X”, “Y” y “Z” la otra. Pegadas a estas inductancias aparecen unas resistencias pequeñas, que se corresponden con el valor resistivo de los mismos devanados, siendo de valor 0’5 ohmios en el caso de los arrollamientos primarios y de 0’45 ohmios para los secundarios.

Otro elemento que aparece en el circuito es la toma de tierra. Todo circuito tiene que estar referenciado a un nivel de tensión nulo y de esta manera se consigue, conectando una toma de tierra

en el lado primario y otra en el secundario. Por último, se pueden apreciar unas resistencias de valor 1000000 ohmios. Como se vio en la introducción teórica, el ensayo de vacío se caracteriza por tener la salida de la máquina sin conexión alguna, es decir, sin circulación de corriente eléctrica. Para un correcto cálculo de las magnitudes, así como saber lo que ocurre en el devanado primario cuando se produce esta situación, es preciso simular en el circuito que los devanados secundarios o salidas no están conectados a nada. Esto se consigue añadiendo unas resistencias muy altas, como es el caso. De no conectar nada y dejar las salidas abiertas, el programa no funcionaría.

En esta siguiente **Figura 57**, se ven algunas de las condiciones que se deben dar para que se realicen correctamente los cálculos. Entre ellas se encuentra el porcentaje de error.

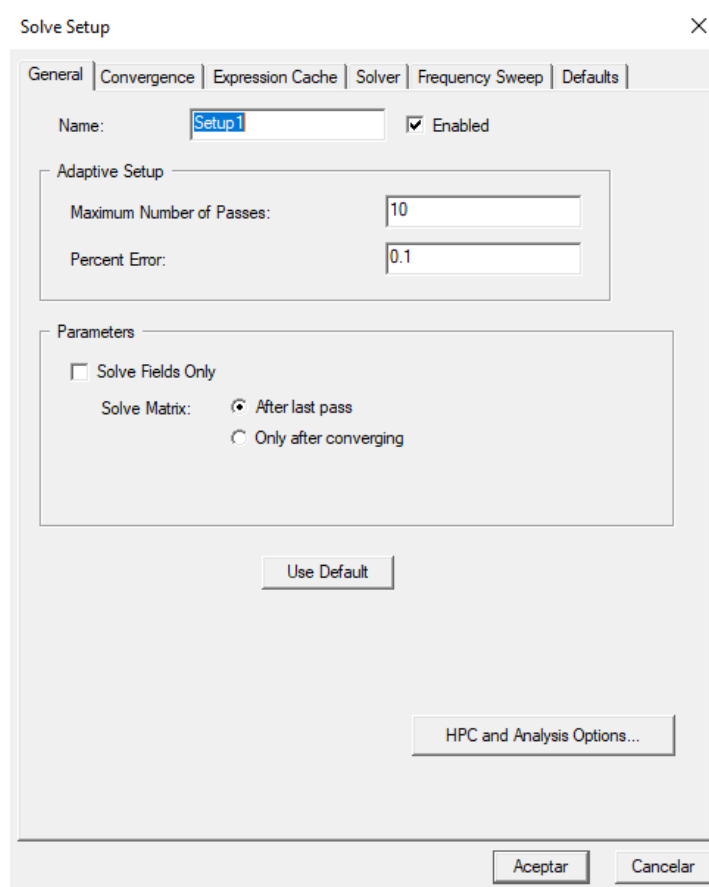


Figura 57 Solve Setup 1. General. (Elaboración propia mediante el programa Ansys). [25]

En esta otra pestaña **Figura 58**, denominada "solver", se puede establecer la frecuencia sobre la que se van a realizar los cálculos.

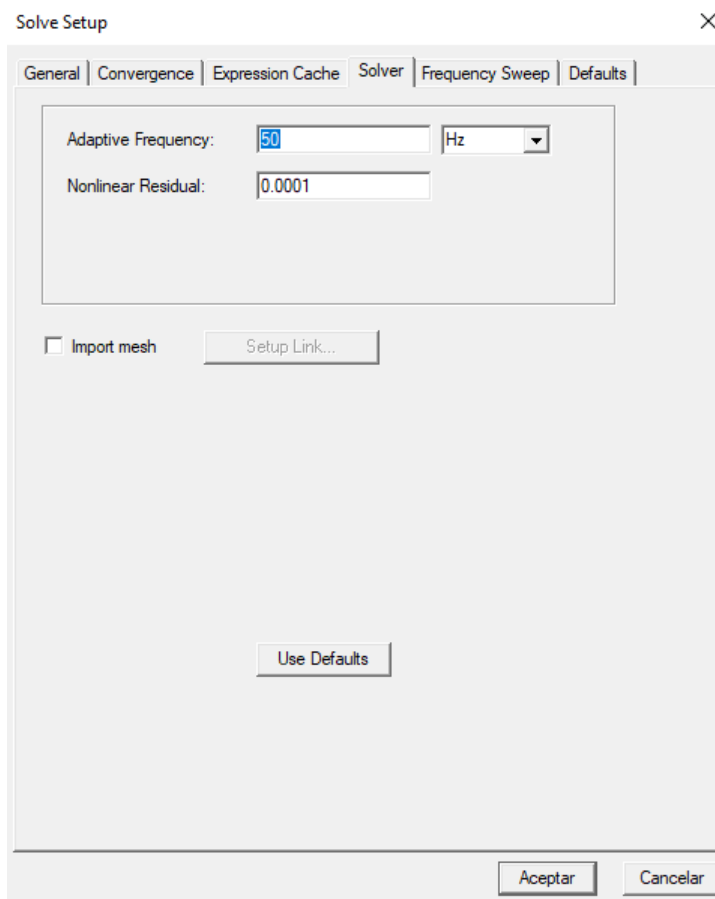


Figura 58 Solve Setup 2. Solver. (Elaboración propia). [25]

Una vez visto esto, ya se puede proceder a la resolución del ensayo de Vacío. En la siguiente imagen, **Figura 59**, se encontrará la pestaña "Solution data". En ella están representados los resultados de las pérdidas de energía obtenidas durante la simulación. Por tanto, se observan unas pérdidas en el núcleo magnético o "Core Loss" de valor **81'335 W** y otras en los devanados o "Stranded Loss" de valor **0'019885 W**. Si se para a analizar los valores de pérdidas, este último valor confirma el correcto funcionamiento del circuito eléctrico, ya que un valor nulo en las pérdidas de los devanados del transformador se corresponde con un valor nulo de corriente en el devanado secundario, característica imprescindible del ensayo de Vacío.

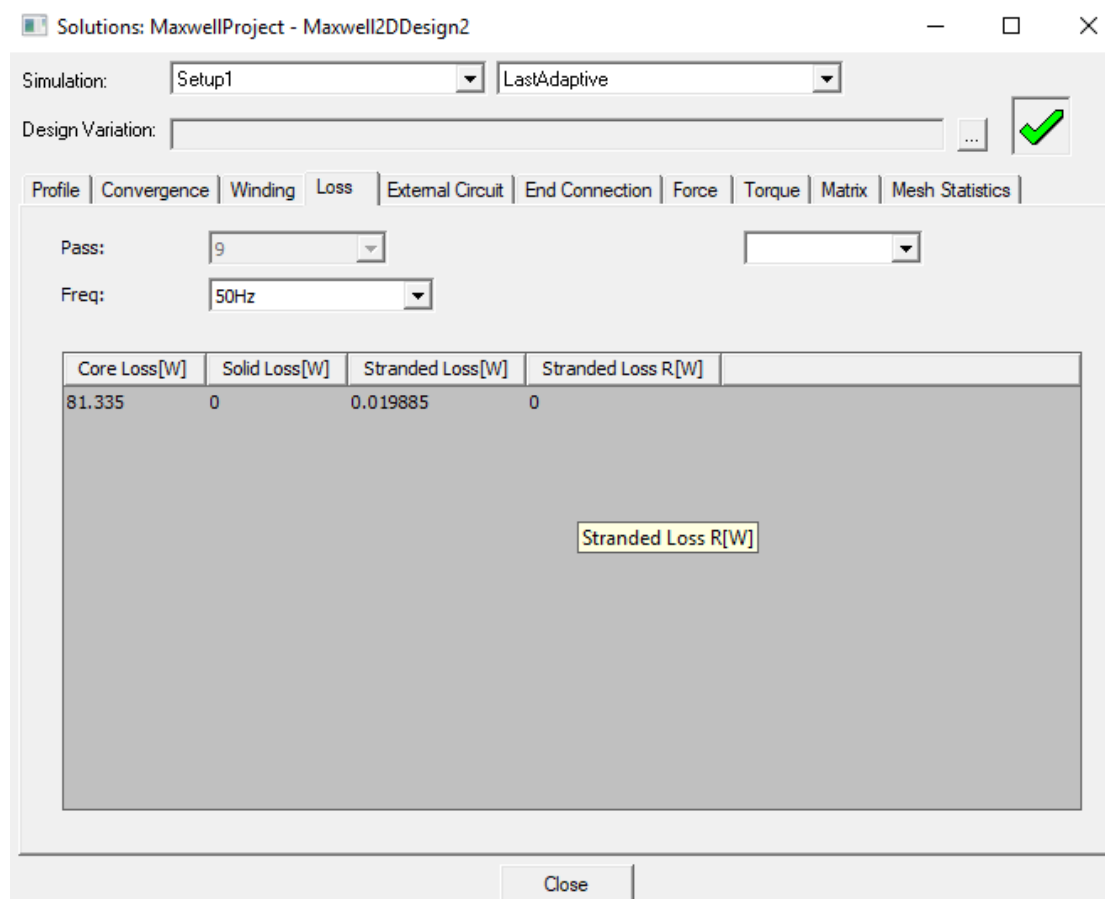


Figura 59 Solution Data, ensayo de Vacío. (Elaboración propia). [25]

En la siguiente ilustración, **Figura 60**, se puede apreciar gracias a la diferenciación por colores que nos permite realizar la herramienta del programa llamada: “Mag_B”, la saturación del campo magnético obtenida en el ensayo. Esta saturación del campo magnético o valores de inducción magnética obtenidos a lo largo de la máquina, están medidos en “Teslas”, que es la unidad de la inducción magnética, como se vio en el apartado teórico.

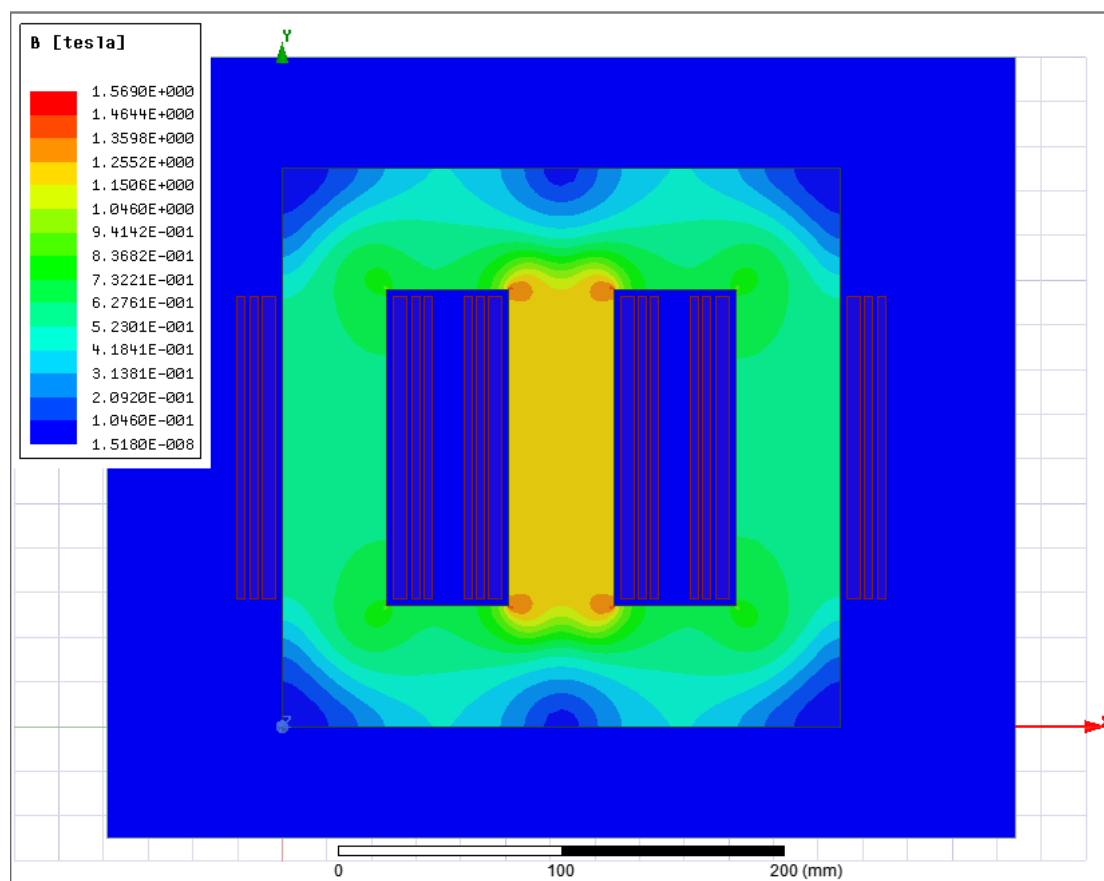


Figura 60 Saturación del campo magnético en el ensayo de Vacío.
(Elaboración propia). [25]

Los valores se encuentran dentro de un rango controlado que va desde 0 a 1'5 Teslas en el caso más elevado.

En la siguiente tabla, **Tabla 11** y sus correspondientes gráficos, **Figura 61** , **Figura 62** se ven los resultados obtenidos en cuanto a tensiones y corrientes en los devanados de la máquina como las pérdidas obtenidas en los mismos, además de las pérdidas en el núcleo magnético.

Devanados	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Tensiones	228,6	228,6	228,6	136,1	136,1	136,1	136,1	136,1	136,1
Corrientes	0,2133	0,1537	0,2152	0,0028	0,0028	0,0028	0,0034	0,0034	0,0034

Tabla 11. Resultados de tensiones y corrientes para la simulación en Vacío.
(Elaboración propia). [22]

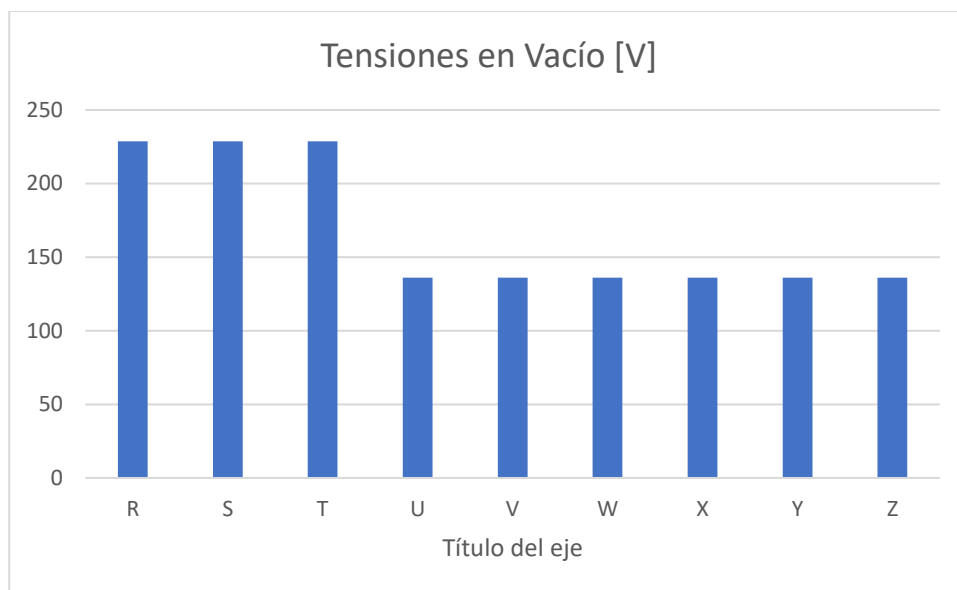


Figura 61 Gráfico de tensiones para la simulación en Vacío. (Elaboración propia). [22]

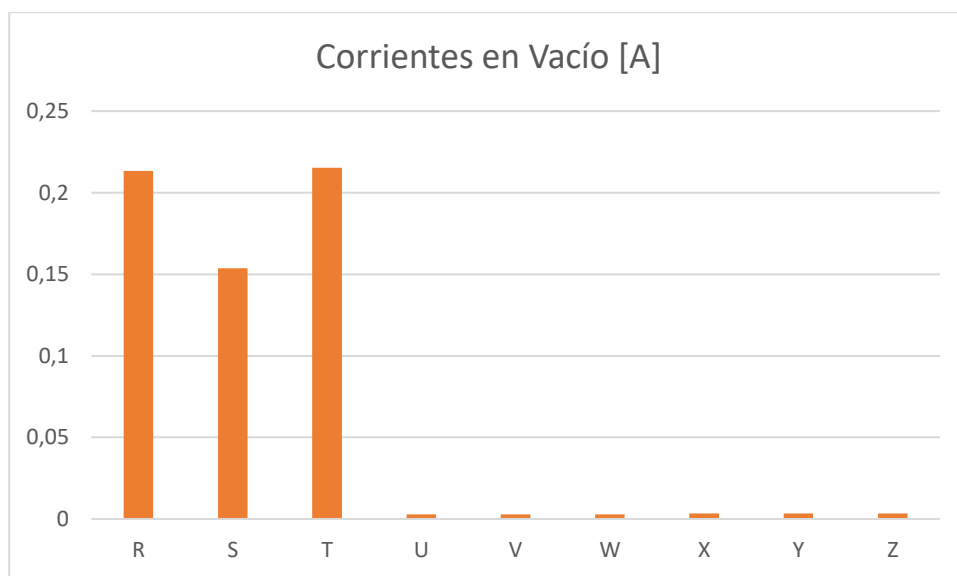


Figura 62 Gráfico de corrientes para la simulación en Vacío. (Elaboración propia). [22]

Los resultados de pérdidas en el cobre y pérdidas en el núcleo magnético se muestran en el siguiente gráfico, **Figura 63**.

Como se vio en la parte teórica, el ensayo de vacío muestra las pérdidas en el núcleo magnético o “Core Losses”, en este caso alcanzan un valor de **81'3 W**.

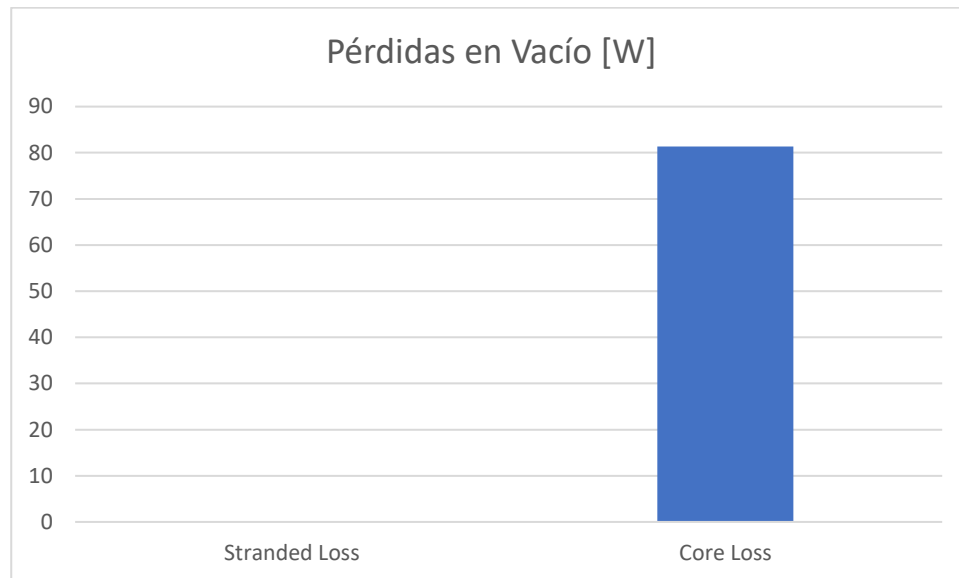


Figura 63 Resultados de pérdidas de la simulación de Vacío. (Elaboración propia). [22]

8.1.5 Ensayo de Cortocircuito.

Para el caso del ensayo de Cortocircuito, el banco de ensayos queda representado de la siguiente manera en la **Figura 64**.

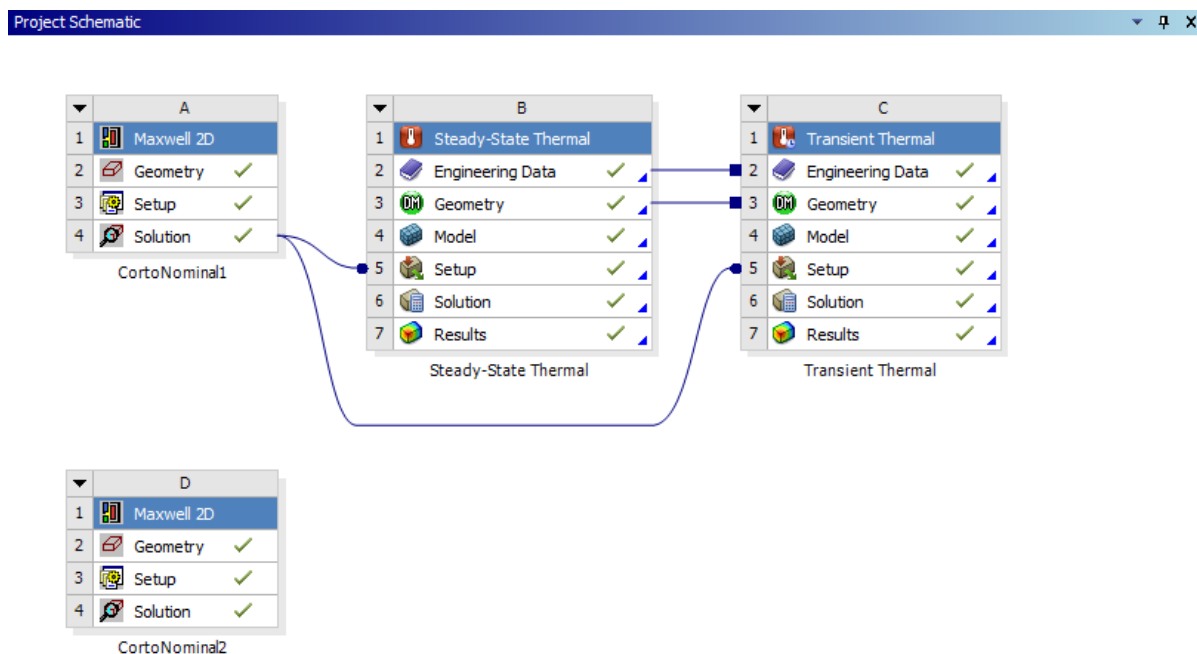


Figura 64 Banco de trabajo en el ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [25]

Se puede apreciar que también se han realizado dos ensayos eléctricos. En este caso, las conexiones utilizadas son las mismas para los dos. Como se cuenta con dos devanados secundarios, se ha decidido simular primero, un cortocircuito en el primer devanado secundario, que se correspondería con las inductancias U, V y W, y segundo, otro ensayo para las inductancias X, Y y Z.

No existen diferencias a la hora de realizar un ensayo u otro, por tanto, no será necesario una explicación detallada de cada paso en este proceso. Si que hay diferencias en el circuito externo utilizado, que serán definidas a continuación. El estudio se centrará en el primer ensayo, es decir, para el que se ha realizado el cortocircuito en el primer devanado secundario.

En la **Figura 65** , se puede observar el circuito externo comentado.

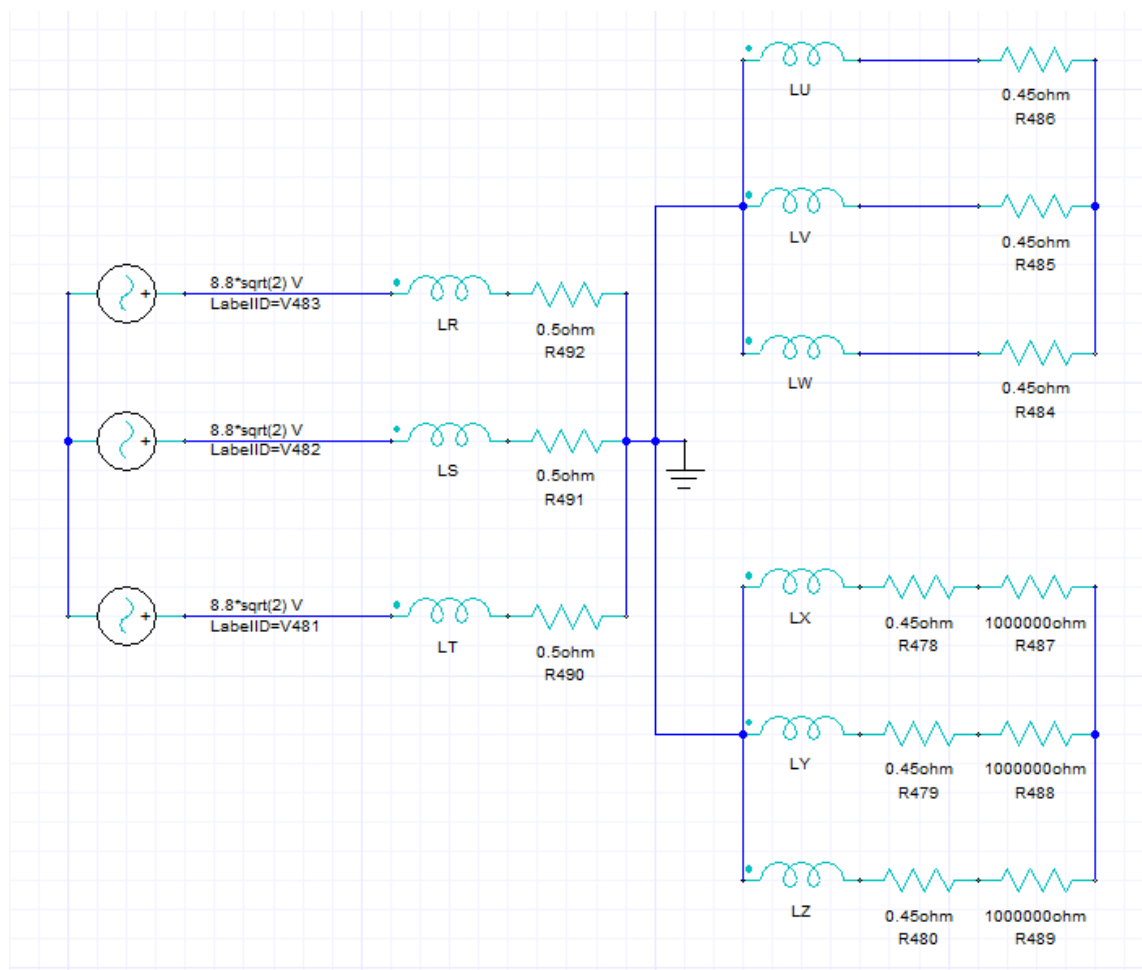


Figura 65 Circuito de conexiones para el ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [25]

Se ve que el devanado secundario que no interesa, que es el de las inductancias X, Y y Z, está conectado en Vacío, como se explicó en el apartado anterior. Se han utilizado unas resistencias que simulan un circuito abierto y cuyo valor es de **1000000 ohmios**.

Para las inductancias a estudiar, se ha utilizado una conexión en cortocircuito como indica el ensayo. Debido a una complicación técnica a la hora de realizar este mismo ensayo en la bancada real, no se ha podido utilizar valores nominales en cuanto a tensión y corriente que circulan por el transformador a la hora de producirse el fallo. Es por ello, que se han tomado unos valores de **8'8 V** para las fuentes de tensión alterna, lo que nos permite que se transmita una corriente por los devanados primarios de valor igual a **5 A**, que se corresponde con el valor máximo que permite suministrar la fuente de energía del laboratorio, para estas condiciones de falta. De este modo, se puede realizar una comparativa entre ambos ensayos, el simulado y el real.

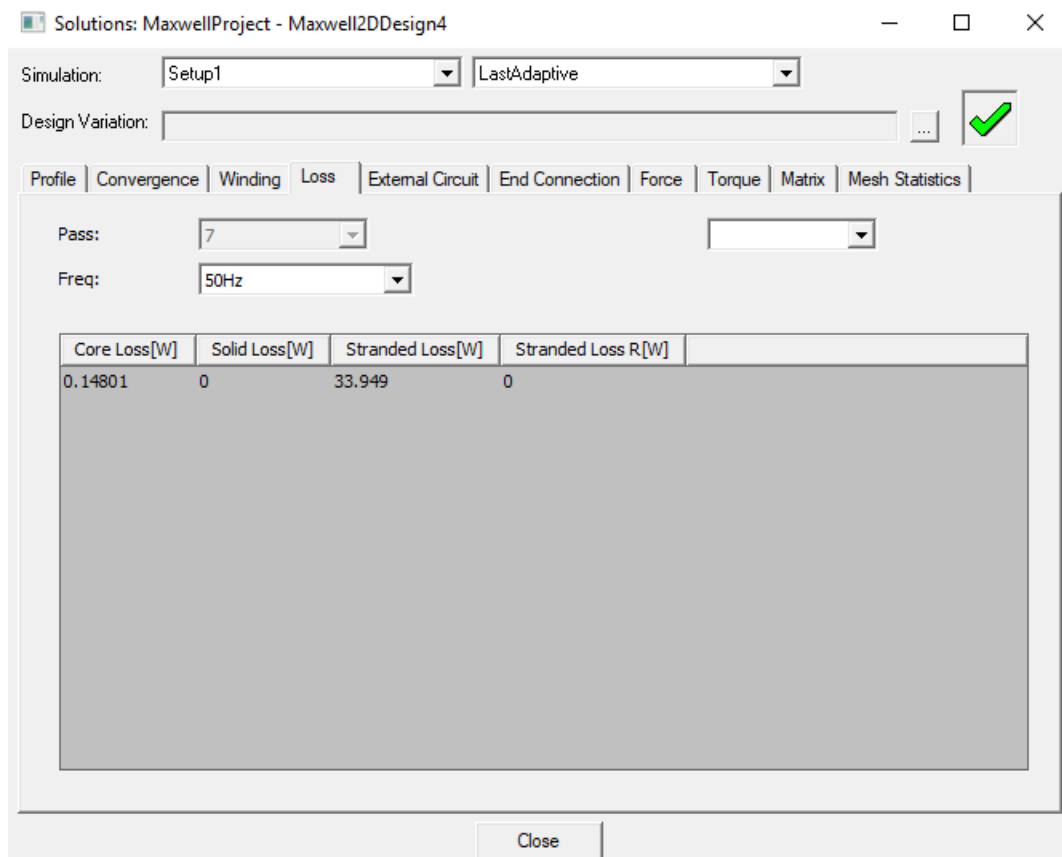


Figura 66 Solutions, Ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [25]

En la **Figura 66** se representan los resultados de nuestro ensayo electromagnético. Los valores obtenidos son de **0'14801 W**, para las pérdidas en el núcleo de la máquina y de **33'949 W** para las pérdidas en el cobre.

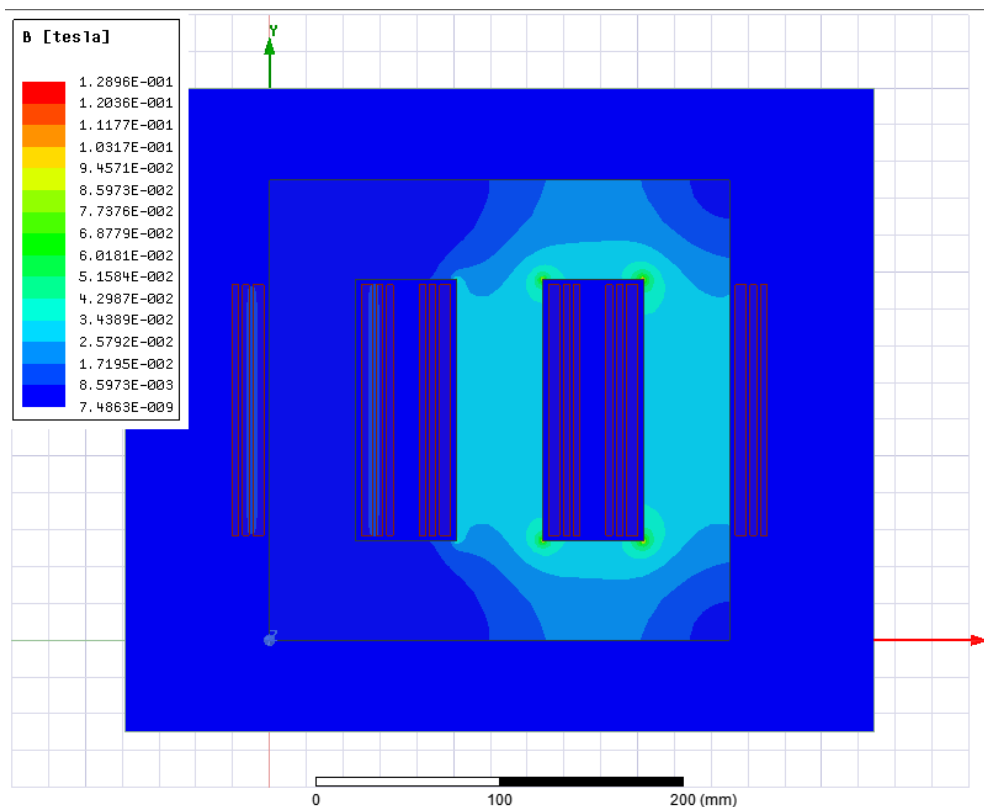


Figura 67 Saturación magnética en el ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [25]

Análogamente al ensayo de Vacío, en la **Figura 67** se puede observar la saturación del campo magnético a la que se somete el transformador. Queda bastante claro que la saturación es de un orden menor que en el apartado anterior, obteniéndose su máximo cercano a los **0'13 Teslas** para las esquinas de las cavidades en el núcleo, y unos valores mínimos del orden de **1×10^{-8} Teslas**.

En las siguientes tablas, **Tabla 12** y sus correspondientes gráficos, **Figura 68** , **Figura 69** se ven los resultados obtenidos en cuanto a tensiones y corrientes en los devanados de la máquina como las pérdidas obtenidas en los mismos, además de las pérdidas en el núcleo magnético.

Devanados	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Tensiones	6,29	6,29	6,29	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74
Corrientes	4,96	4,96	4,96	8,32	8,32	8,32	0	0	0

Tabla 12. Resultados de tensiones y corrientes para la simulación en Cortocircuito.
(Elaboración propia). [22]

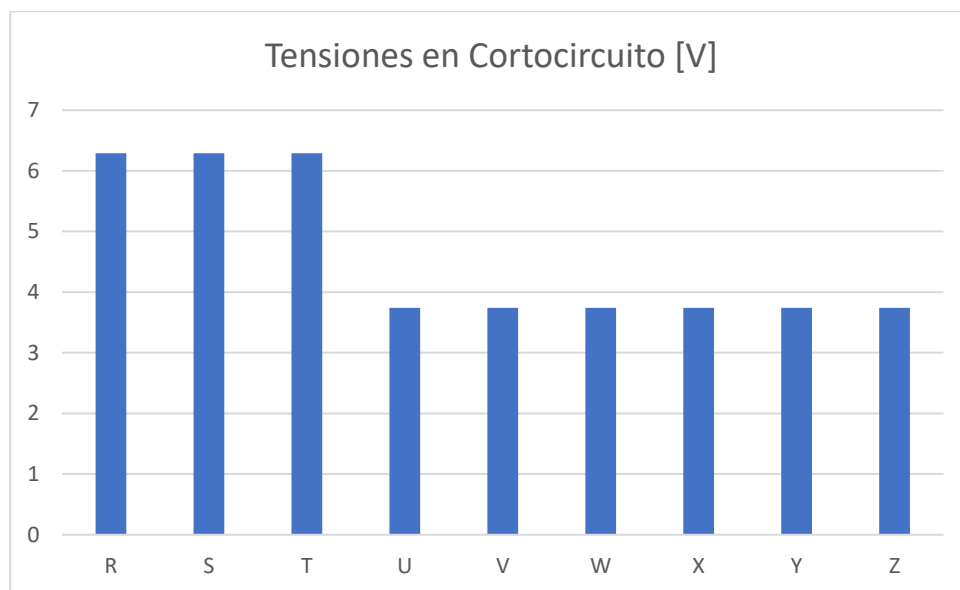


Figura 68 Gráfico de tensiones para la simulación en Cortocircuito.
(Elaboración propia). [22]

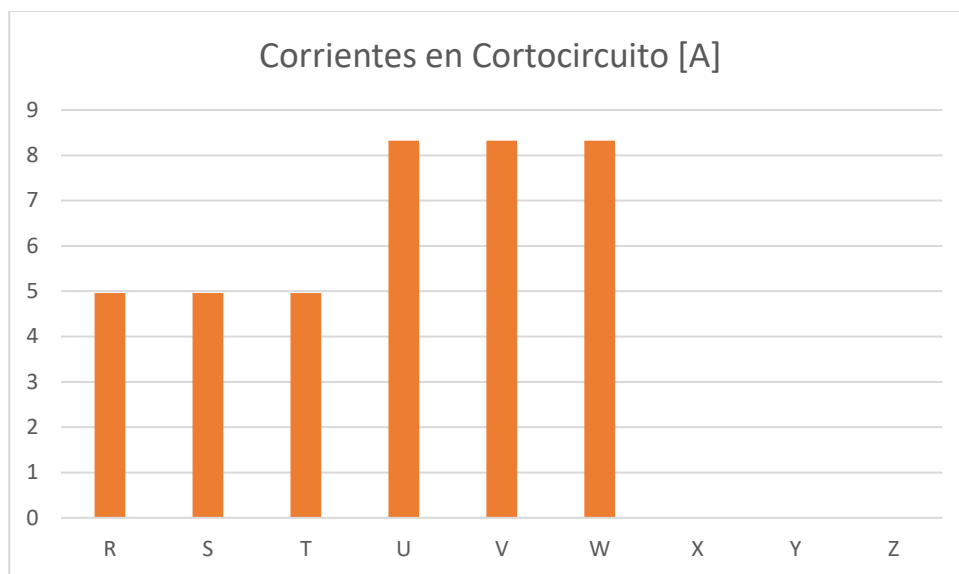


Figura 69 Gráfico de corrientes para la simulación en Cortocircuito. (Elaboración propia). [22]

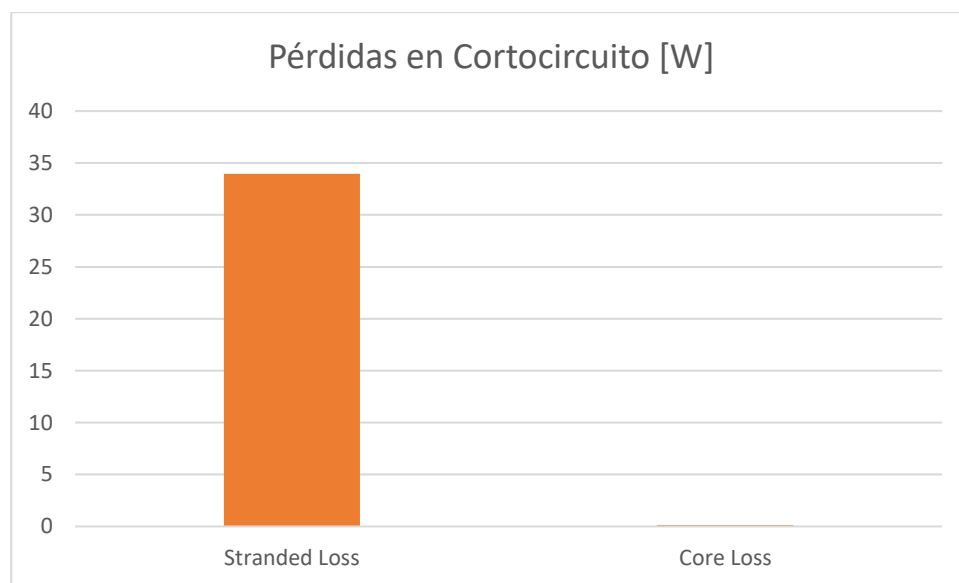


Figura 70 Resultados de pérdidas de la simulación de Cortocircuito. (Elaboración propia). [22]

En la **Figura 70**, se pueden observar los resultados de pérdidas. Como se vio en la parte teórica, el ensayo de cortocircuito muestra el valor de las pérdidas en los devanados, siendo su valor en este ensayo de **33'9 W**. Este desfase entre el valor obtenido en la bancada real y el resultado de la simulación se explica detalladamente en el apartado: **14 Anexo Cálculo de las pérdidas reales de cortocircuito**.

8.1.6 Ensayo de Carga.

Por último, en el ensayo de carga, el banco de trabajo tiene el siguiente aspecto **Figura 71**.

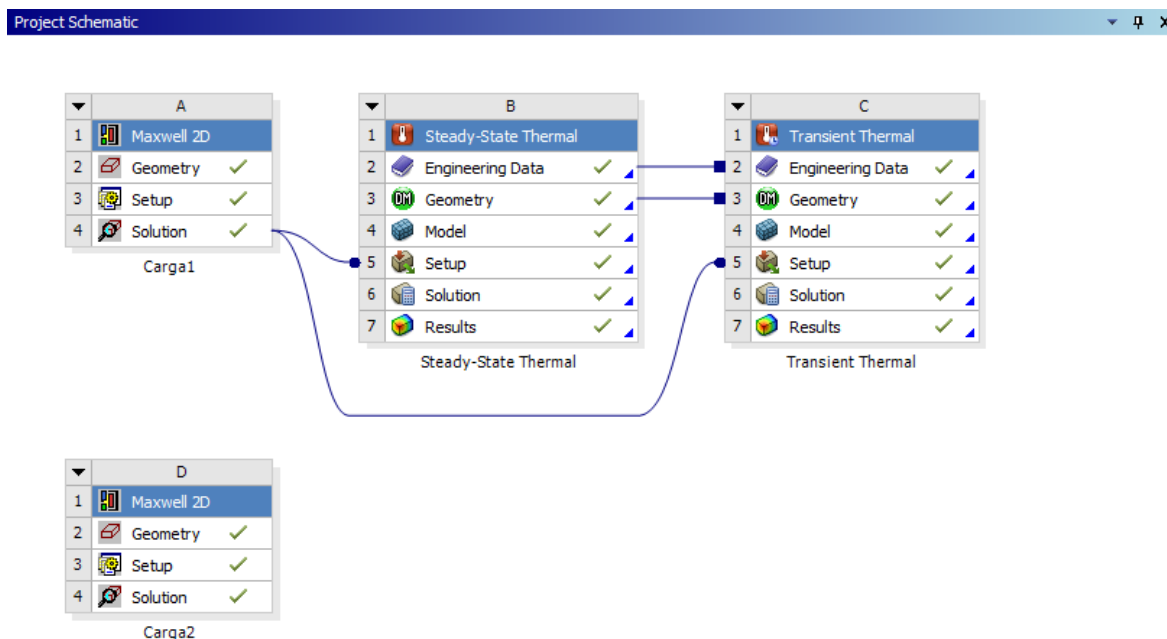


Figura 71 Banco de trabajo para el ensayo de Carga. (Elaboración propia). [25]

Al igual que para el ensayo de cortocircuito, se han realizado dos pruebas. Una de ellas consiste en conectar una carga trifásica a las salidas de primer devanado secundario, mientras que en la otra, se conectarán las cargas en el devanado secundario correspondiente a las inductancias X, Y y Z. Esta segunda prueba no se va a tener en cuenta, y el estudio se centrará en el primer ensayo realizado, al igual que en apartados anteriores, ya que los resultados obtenidos para uno y otro no varían.

Las conexiones del circuito externo quedan definidas en la siguiente **Figura 72**, e incluyen las cargas conectadas.

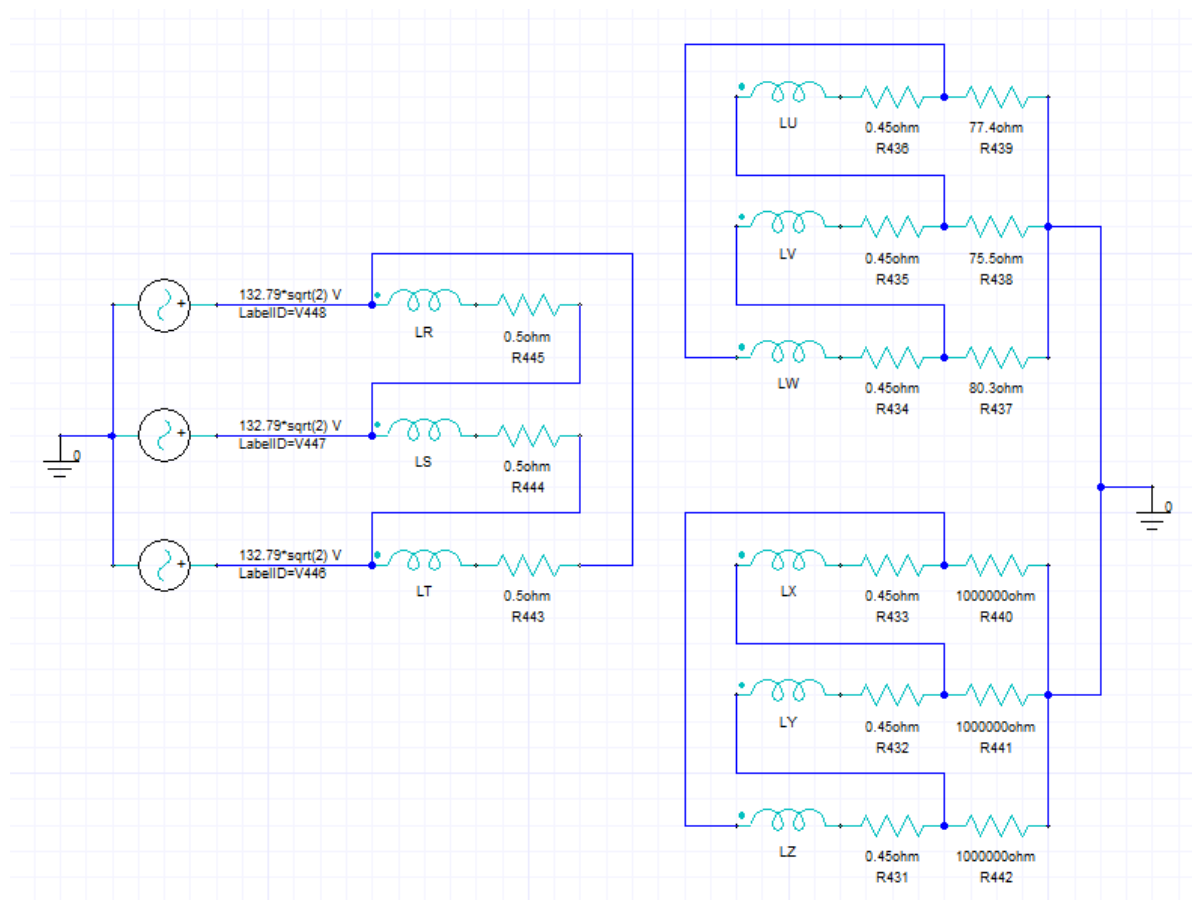


Figura 72 Circuito de conexiones para el ensayo de Carga. (Elaboración propia). [25]

Como se puede observar, los devanados que no van a influir en el estudio están conectados en vacío, al igual que en el ensayo de cortocircuito. Esto supone conectarse a unas resistencias muy elevadas del orden de **1000000 de ohmios**, como es el caso.

Este ensayo ha sido realizado con anterioridad en nuestro laboratorio. Esto quiere decir que los valores utilizados en el mismo han sido probados en nuestras máquinas reales y verifican el buen cumplimiento de las limitaciones técnicas. Ahora bien, las medidas utilizadas para el cumplimiento de estas limitaciones son las siguientes.

Primero, al igual que en el ensayo de vacío, el nivel de tensión de las fuentes de alterna es de **132 V**, y la conexión de los devanados primarios está realizada en triángulo, lo que nos asegura una alimentación de los devanados de **230 V**, es decir, a tensión nominal.

Las cargas utilizadas tienen los valores de: **77'4 ohmios**, **75'5 ohmios** y **80'3 ohmios**. Estos valores permiten una intensidad en los circuitos secundarios que se mantiene dentro de los límites que permite nuestra fuente de alimentación. Así se asegura que la potencia que se transmite a las cargas tenga un margen lo bastante amplio como para no perjudicar o quemar las resistencias utilizadas.

Se han utilizado estos mismos valores para ver una comparación verídica entre lo estudiado en la bancada de ensayos y lo simulado en este ensayo.

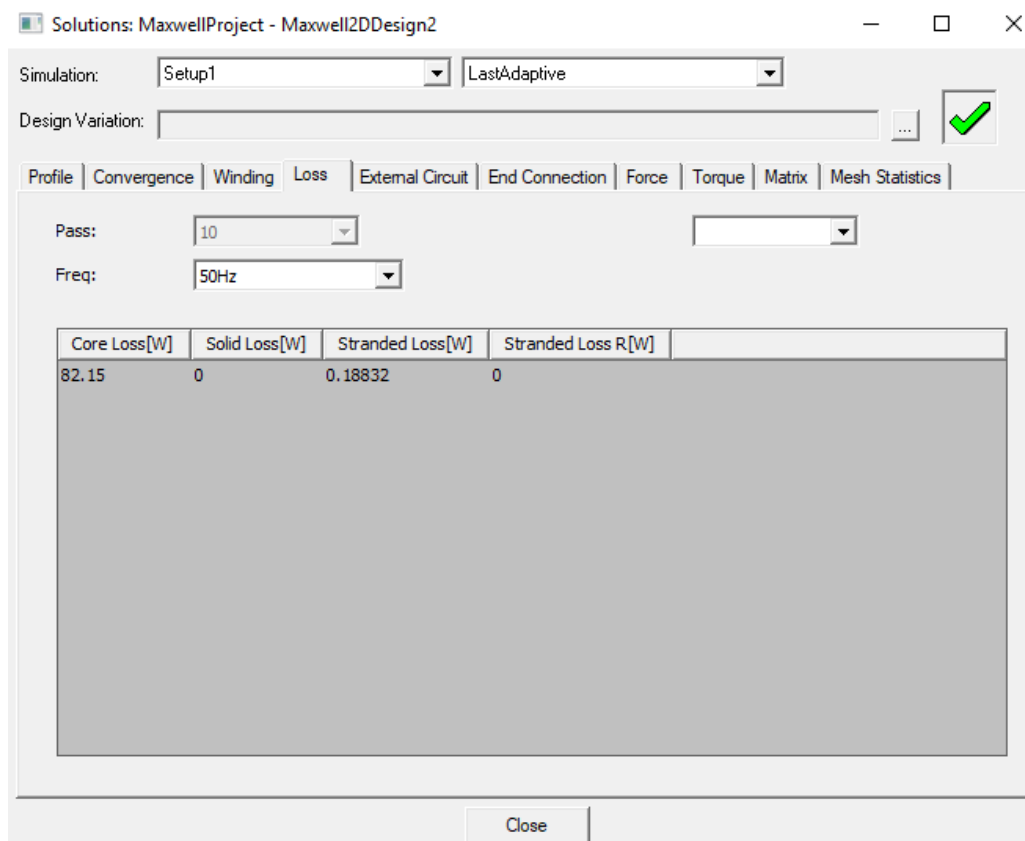


Figura 73 Solutions, ensayo de Carga. (Elaboración propia). [25]

En la **Figura 73** se ven los resultados obtenidos. Las pérdidas en el cobre o “Stranded Loss” tienen un valor de **0'18832 W**, mientras que las pérdidas en el núcleo o “Core Loss” alcanzan un valor de **82'15 W**.

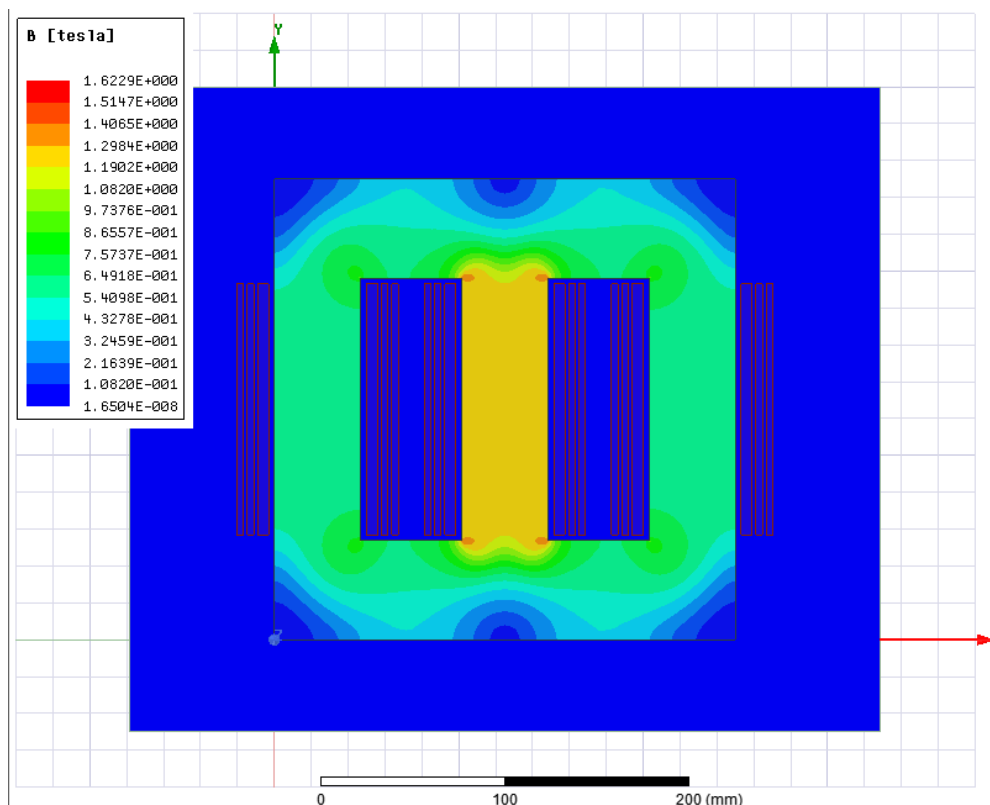


Figura 74 Saturación magnética en el ensayo de Carga. (Elaboración propia). [25]

En la **Figura 74** se ve la saturación del campo magnético que se produce en la máquina en la realización de este ensayo. La saturación máxima se alcanza en el núcleo magnético y es del orden de **1'63 Teslas**.

En las siguientes tablas, **Tabla 13** y sus correspondientes gráficos, **Figura 75**, **Figura 76**, se pueden ver los resultados obtenidos en cuanto a tensiones y corrientes en los devanados de la máquina como las pérdidas obtenidas en los mismos, además de las pérdidas en el núcleo magnético.

Devanados	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Tensiones									
[V]	229,79	229,82	229,84	136,87	136,88	136,91	136,86	136,88	136,89
Corrientes									
[A]	0,4491	0,3792	0,3728	0,5941	0,5838	0,5805	0,0032	0,0032	0,0032

Tabla 13. Resultados de tensiones y corrientes para la simulación en Carga. (Elaboración propia). [22]

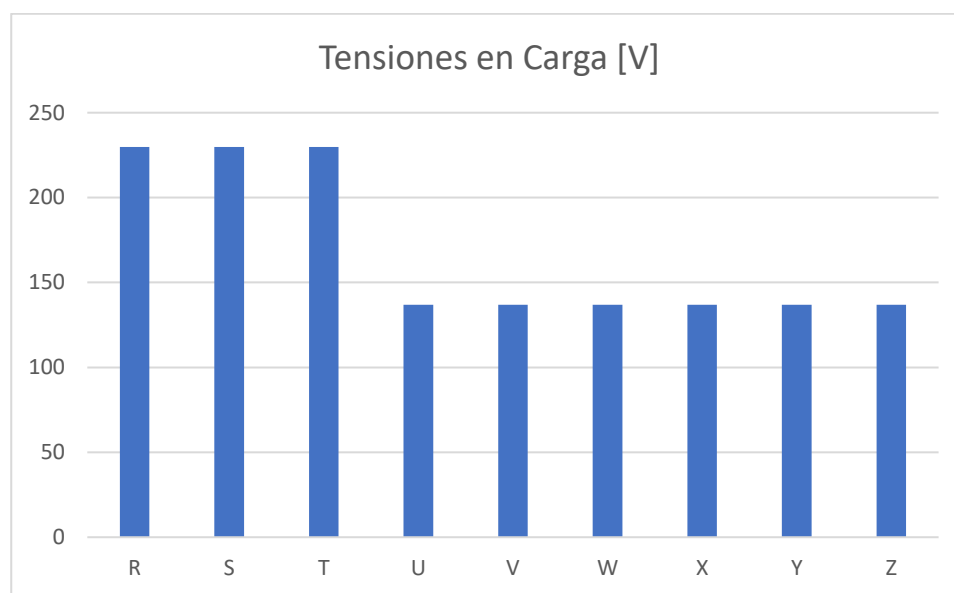


Figura 75 Gráfico de tensiones para la simulación en Carga. (Elaboración propia). [22]

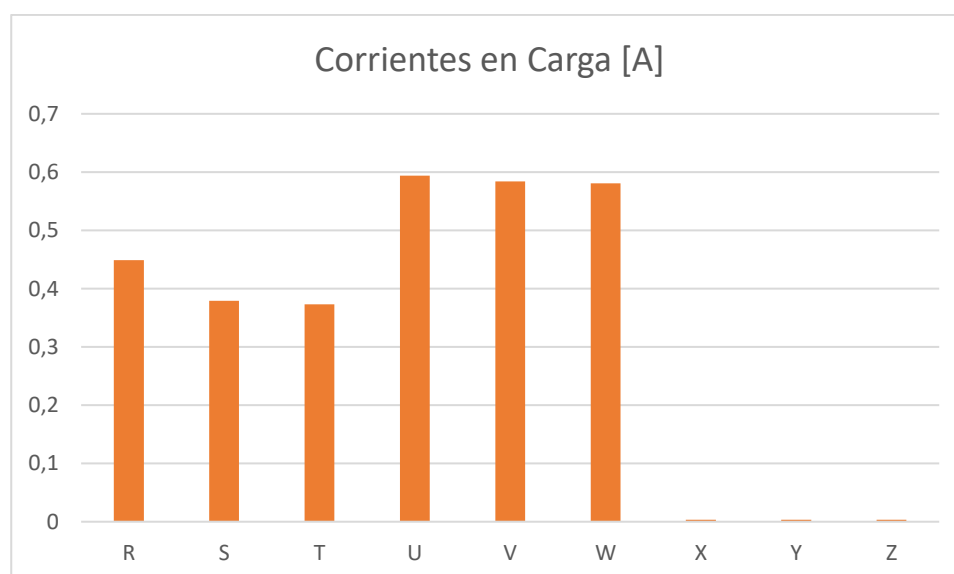


Figura 76 Gráfico de corrientes para la simulación en Carga. (Elaboración propia). [22]

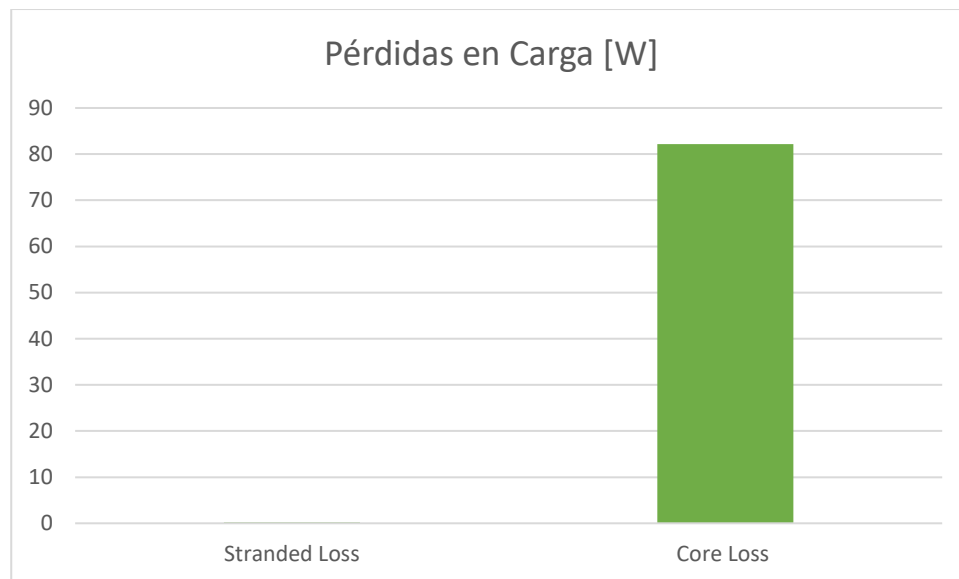


Figura 77 Resultados de pérdidas de la simulación de Carga. (Elaboración propia). [22]

Se ven los valores de las pérdidas en carga en la **Figura 77**. Como se ha visto en la simulación de cortocircuito, las pérdidas en el cobre no pueden ser obtenidas a través de este estudio debido a la configuración del ensayo en dos dimensiones, por tanto, se analiza la correspondencia de las pérdidas en el núcleo magnético en el apartado de validación del modelo.

8.2 Transient Thermal. Ensayo Térmico.

Una vez visto el ensayo electromagnético, se puede proceder con el ensayo térmico. También estará documentado y las explicaciones irán acompañadas de imágenes para un mejor entendimiento del proceso.

8.2.1 Importación de datos de la prueba eléctrica.

Antes de comenzar con el ensayo, un requisito previo es la importación de los datos introducidos para la realización y cálculo de la parte electromagnética. Esto quiere decir que se importarán: la geometría introducida en el ensayo eléctrico y además las características propias de esa geometría, como son los materiales de los que está compuesta. Después, también será necesario importar los resultados obtenidos en el ensayo, en concreto se utilizarán para la obtención de las pérdidas de energía en forma de calor. Se pueden ver las conexiones realizadas entre el ensayo en “MAXWELL 2D” y el ensayo en “TRANSIENT THERMAL” en la **Figura 78**, es de esta manera como quedarán importados todos los datos. Esto mismo será realizado tanto para el ensayo de Vacío, como para los ensayos de Cortocircuito y Carga.

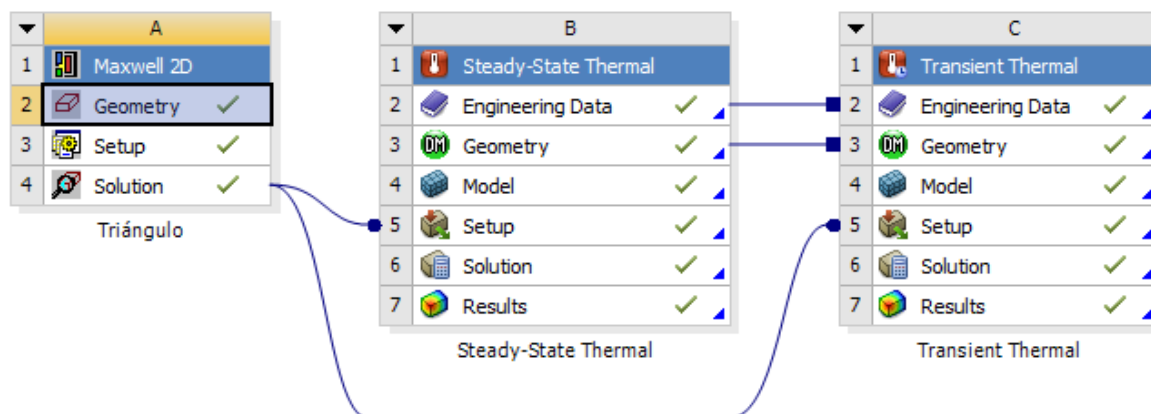


Figura 78 Importación de datos eléctricos al software térmico. (Elaboración propia). [21]

En esta primera imagen, **Figura 79** se puede ver la interfaz que tendrá nuestro ensayo. Al igual que en el anterior, se tienen que establecer previamente unas condiciones en el sistema para que se pueda trabajar correctamente.

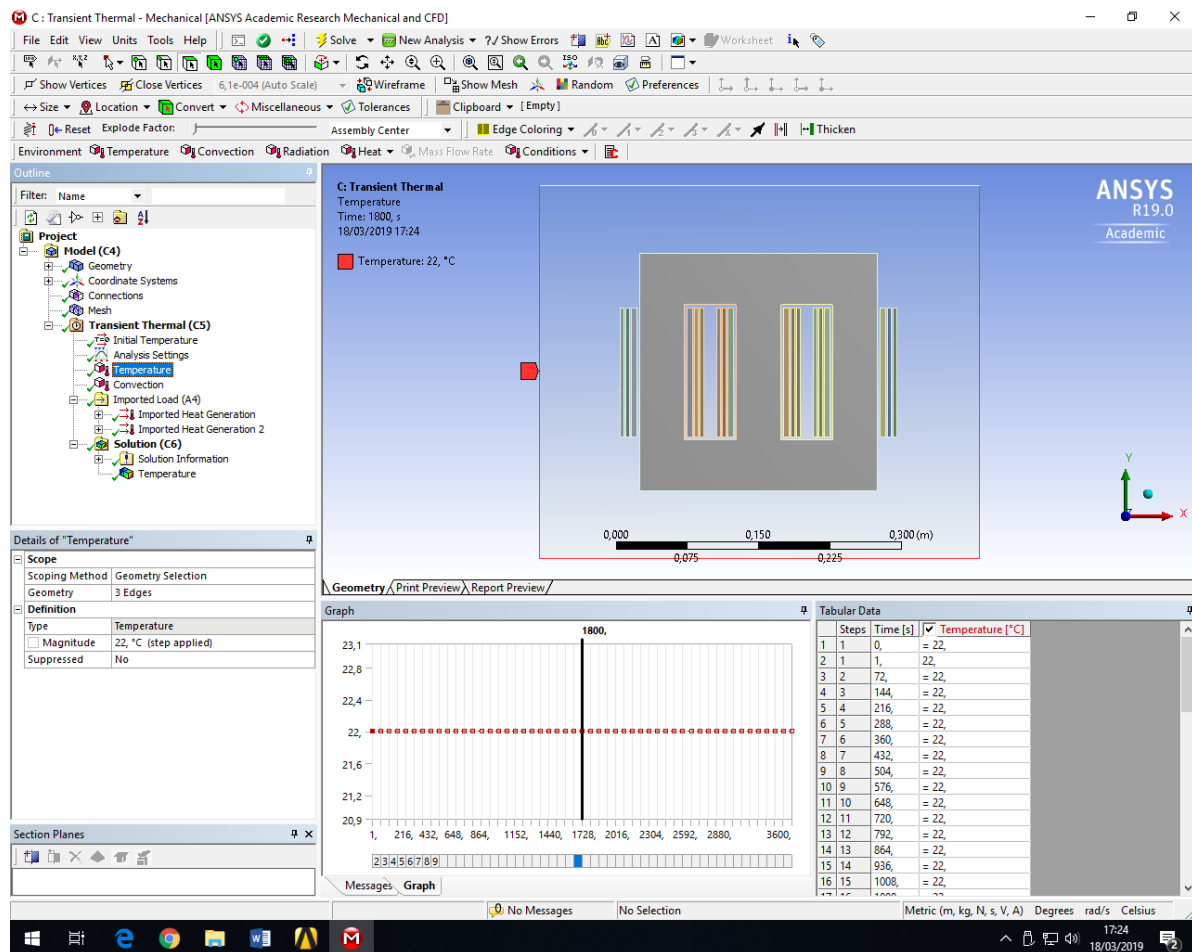


Figura 79 Interfaz ensayo Térmico. (Elaboración propia). [26]

Para que se pueda simular correctamente la transferencia de calor al medio, se tiene que definir una superficie que envuelva nuestro transformador. Esto se puede apreciar en la **Figura 79**, donde se ve un área que rodea a la máquina. Lo que se hará será determinar una temperatura ambiente que se establecerá en nuestra región exterior. Se han seleccionado **22°C**.

La primera herramienta que se utilizará será “Convection” o convección. Con ello, se dejará definida la manera en la que se transmitirá el calor de la máquina eléctrica al exterior. Si se atiende a la definición de convección [28] podemos ver que se define como la transferencia de calor natural entre dos sustancias gaseosas, un gas y un líquido, un gas y un sólido o incluso un líquido y un sólido, cuando están a distinta temperatura. En este caso, la transferencia se realizará entre un sólido, como es la máquina eléctrica, compuesta por su núcleo magnético y los arrollamientos, y un gas, como es el aire que envuelve a la máquina.

Una vez hecho esto, se podrá determinar el tipo de convección que se va a experimentar en el proceso. Se ha optado por un valor de convección de $10 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, el cual se corresponde con el valor de convección natural. Queda representado en la siguiente **Figura 80**.

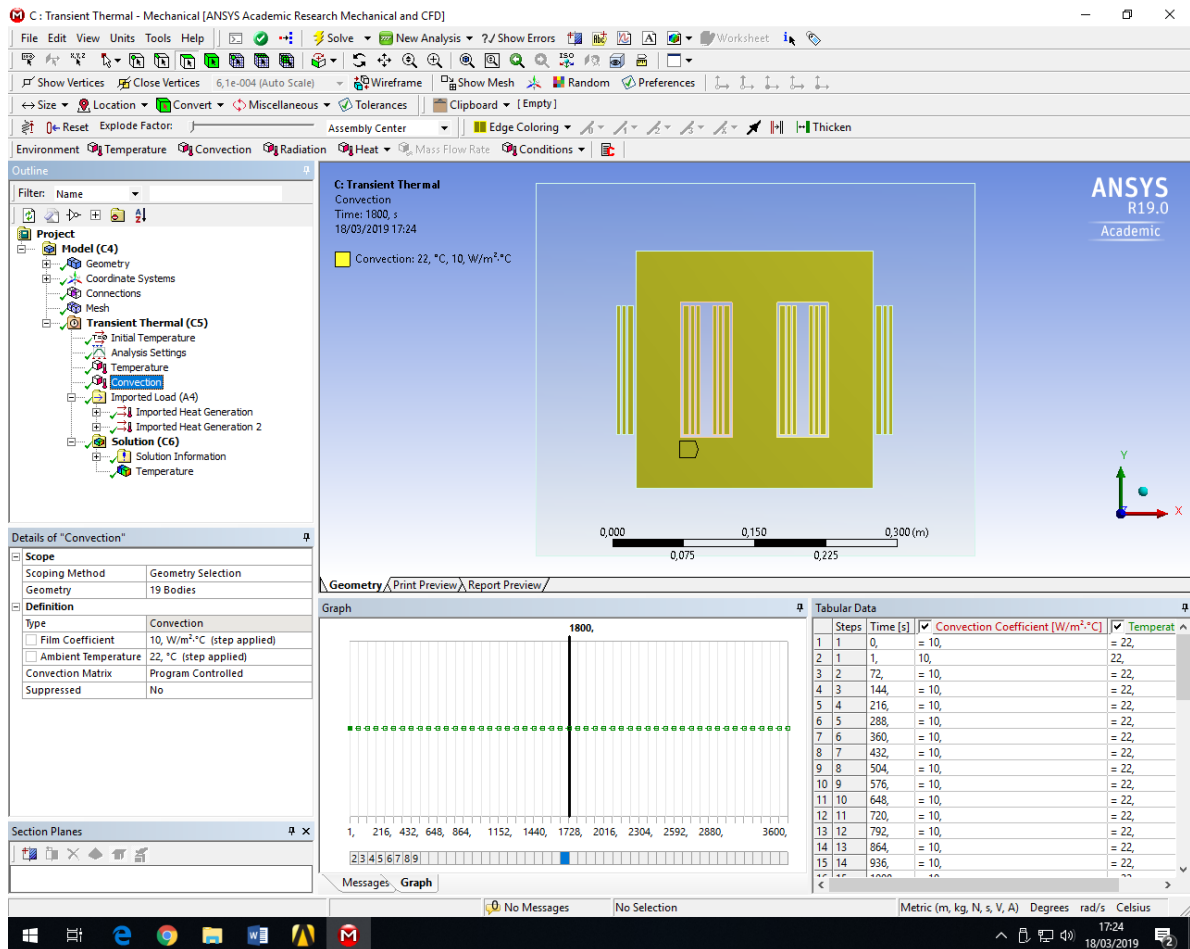


Figura 80 Convection. Ensayo Vacío. (Elaboración propia). [26]

Definido lo anterior, se puede empezar a simular nuestros ensayos térmicos, empezando por el de vacío.

8.2.2 Ensayo de Vacío.

El primer ensayo que se va a realizar, como también se hizo en la parte de la bancada de ensayos, será el ensayo de Vacío. Para ello se importan los datos obtenidos en la resolución eléctrica, esto dará la generación de calor a través de la máquina, como está representada en la **Figura 81**.

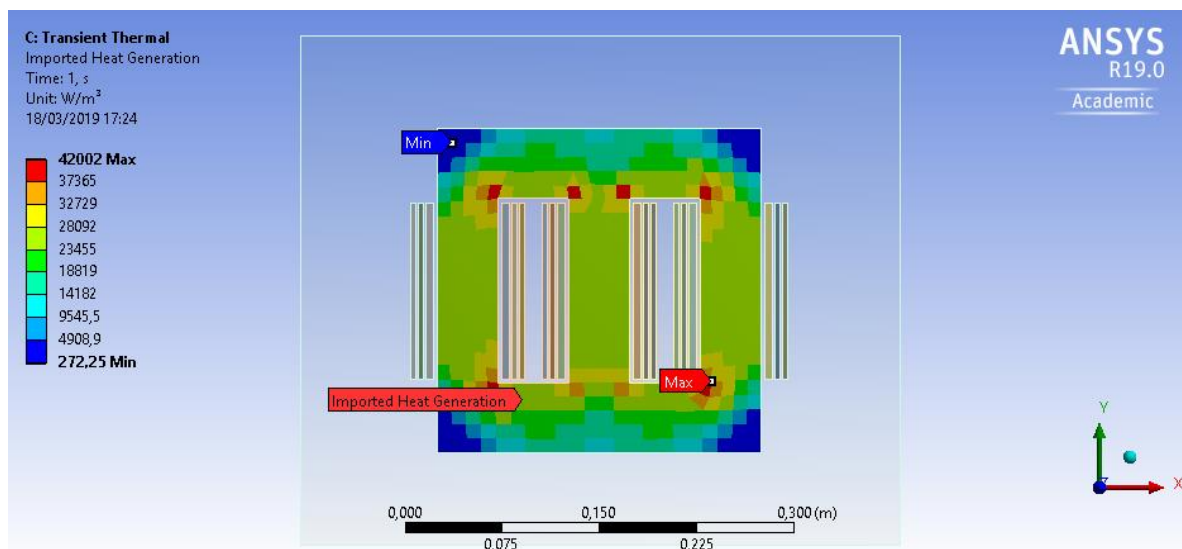


Figura 81 Imported heat generation en el ensayo de Vacío. (Elaboración propia). [26]

Como se puede ver, la mayor potencia calorífica producida se encuentra en las esquinas de las cavidades de nuestro núcleo ferromagnético, donde van arrolladas las bobinas. En estas zonas se alcanzan los **42000 W/m²**. Donde menor potencia se concentra es en los extremos del núcleo, donde se mantienen mínimos de unos **270 W/m²**.

Cabe destacar que, al tratarse del ensayo de Vacío, no se ha representado la potencia calorífica que se da en los arrollamientos, ya que es nula.

Por último, se va a ver la distribución de temperatura que se ha experimentado en el proceso. La simulación transitoria está realizada para media hora de ensayo. Esto se traduce en 1800 segundos, como se puede apreciar en la **Figura 82**. Queda reflejada una variación de la temperatura de entorno a los **10 °C** en ese periodo de tiempo, lo cual es asumible por nuestra máquina eléctrica. Se establece el máximo de temperatura en el núcleo ferromagnético, que alcanza los **32'644 °C**.

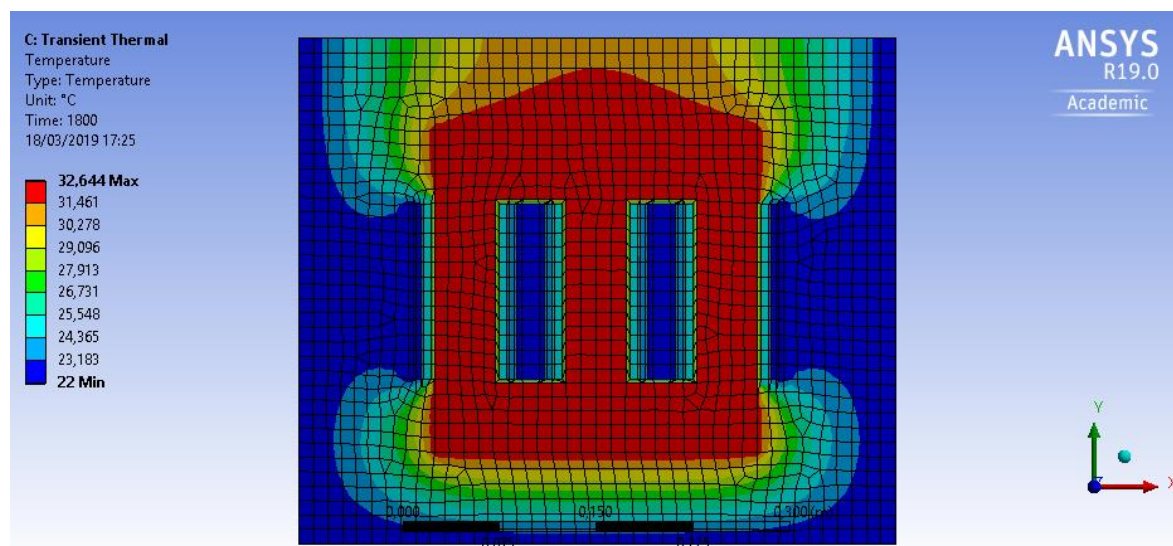


Figura 82 Temperatura del ensayo de Vacío. (Elaboración propia). [26]

Se puede ver bien la variación de temperatura experimentada en el gráfico de la **Figura 83**, en concreto interesa la serie de temperatura máxima, la cual vemos aumentar progresivamente hasta alcanzar la cifra más elevada aportada anteriormente de más de **30°C**.

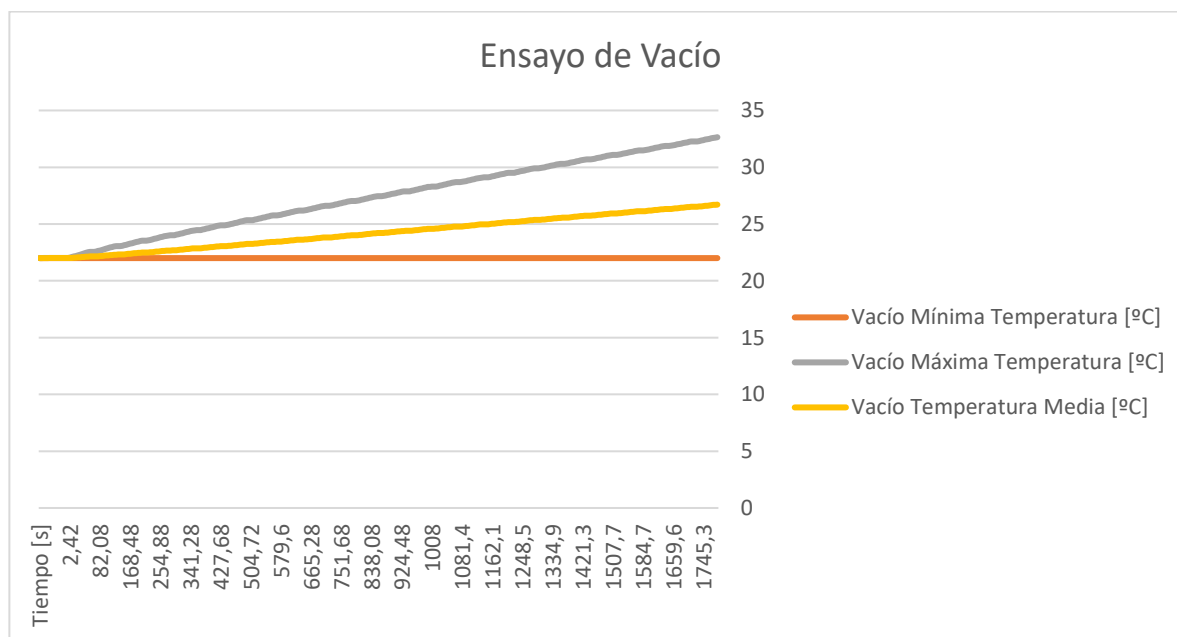


Figura 83 Gráfico de temperatura para el ensayo de Vacío. (Elaboración propia). [22]

8.2.3 Ensayo de Cortocircuito.

En este ensayo se va a observar la variación de temperatura que experimenta el transformador cuando se le somete a una situación de falta, como es el cortocircuito de las fases de los devanados de salida, durante un tiempo aproximado de 30 minutos.

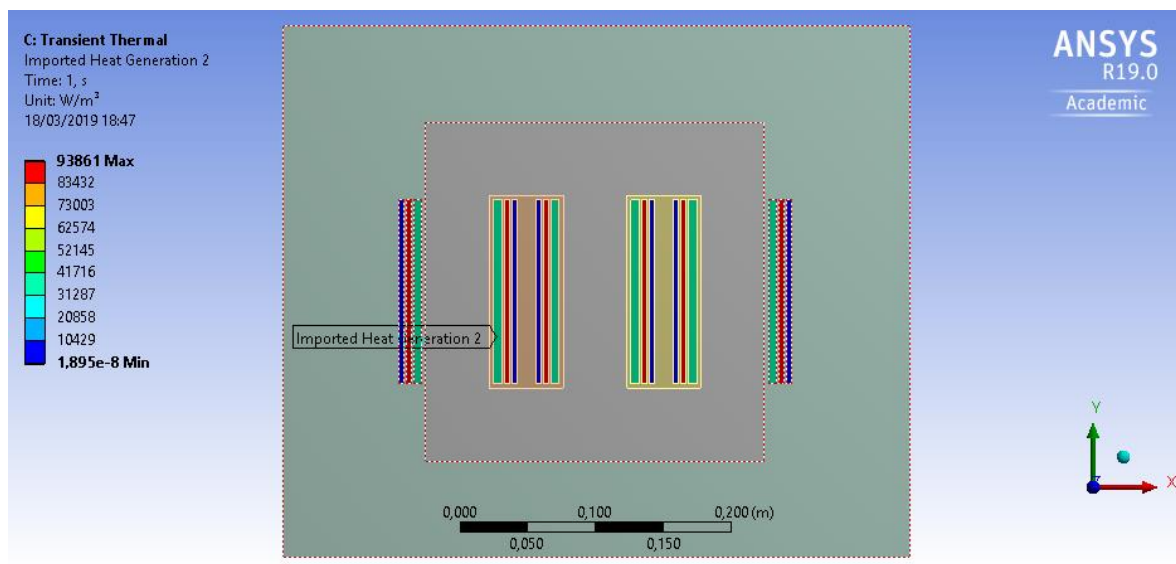


Figura 84 Pantalla ensayo térmico del Cortocircuito. (Elaboración propia). [26]

Al contrario que para el ensayo de Vacío, aquí queda representada la potencia calorífica importada del ensayo electromagnético para las bobinas, ya que no se produce un aumento considerable en las características térmicas de nuestro núcleo dada la tipología del ensayo de Cortocircuito, **Figura 84**. Se puede ver que la potencia máxima alcanzada es **93861 W/m²** y la mínima se corresponde con los devanados secundarios conectados en Vacío, con lo que su valor es nulo.

En esta última imagen **Figura 85**, con la que finaliza el ensayo de Cortocircuito, se puede ver la transferencia de temperatura en el tiempo durante nuestro estudio. La temperatura más alta alcanzada tiene un valor de **45'895 °C** y se produce en el devanado secundario conectado en cortocircuito ya que la intensidad que circula durante la falta es elevada. Esta simulación también tiene un recorrido de media hora, como se puede apreciar en la ilustración.

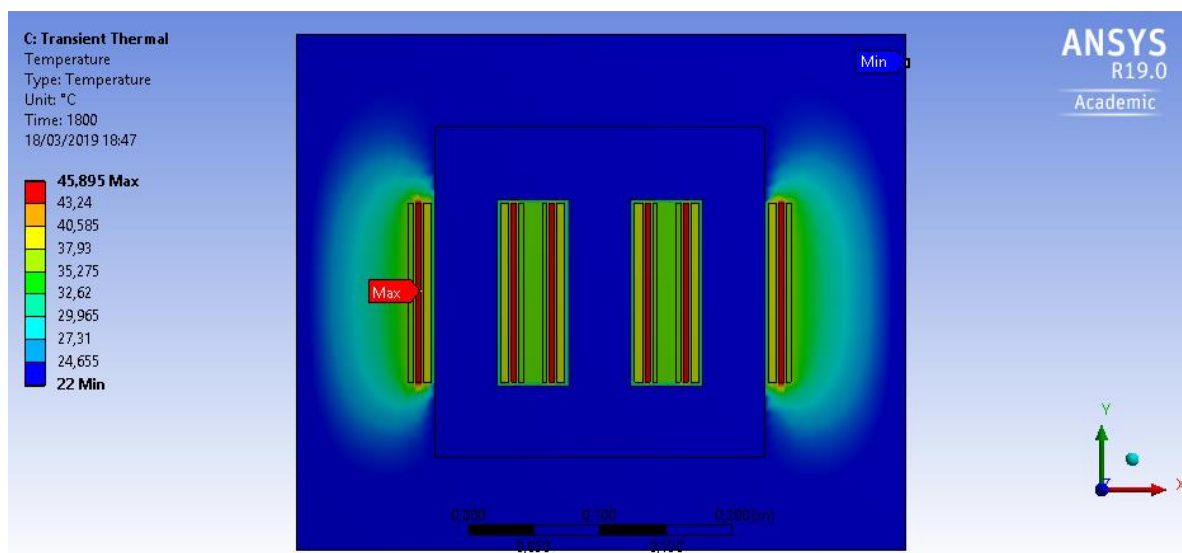


Figura 85 Imported heat generation, ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [26]

La variación de temperatura que se produce en el ensayo de cortocircuito queda representada en el gráfico de la **Figura 86**, donde se puede observar en la serie de temperatura máxima como la temperatura que se registra en los devanados asciende por encima de los **45°C** cuando se llega a la media hora en estado de falta.

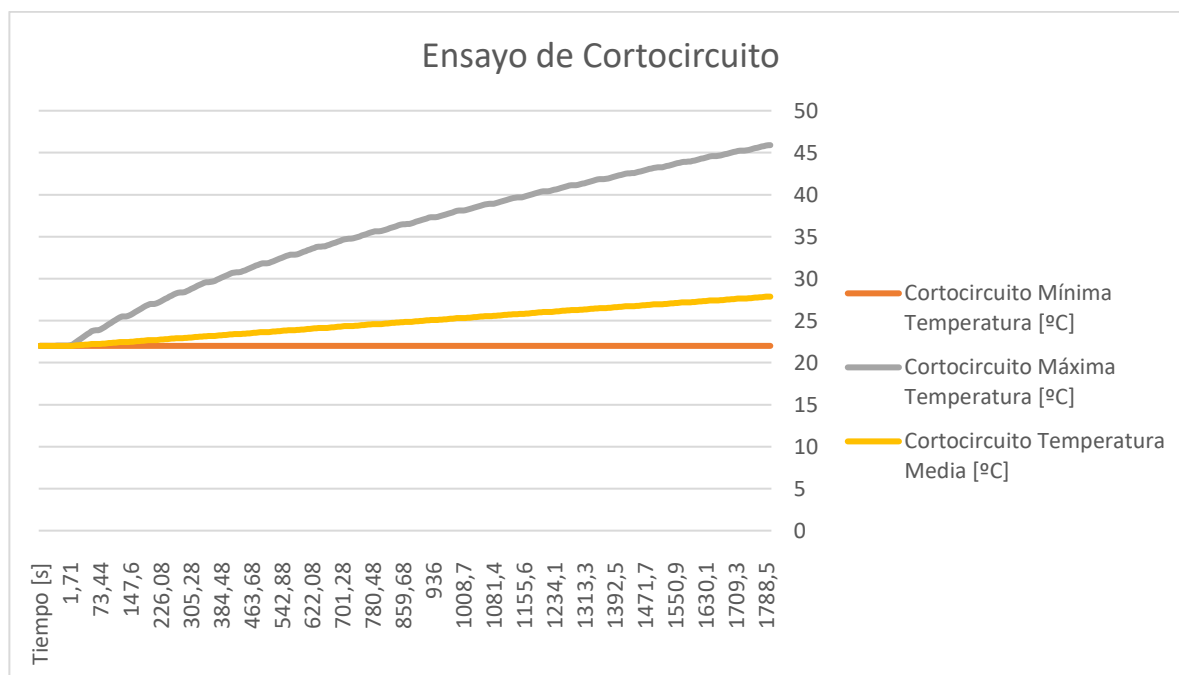


Figura 86 Gráfico de temperatura para el ensayo de Cortocircuito. (Elaboración propia). [22]

8.2.4 Ensayo de Carga.

EL procedimiento para la realización de este ensayo térmico será el mismo planteado para el resto de las pruebas. Ahora bien, se encuentran diferencias una vez importados los datos de nuestro ensayo electromagnético y quedan reflejadas en las imágenes **Figura 87** y **Figura 88**.

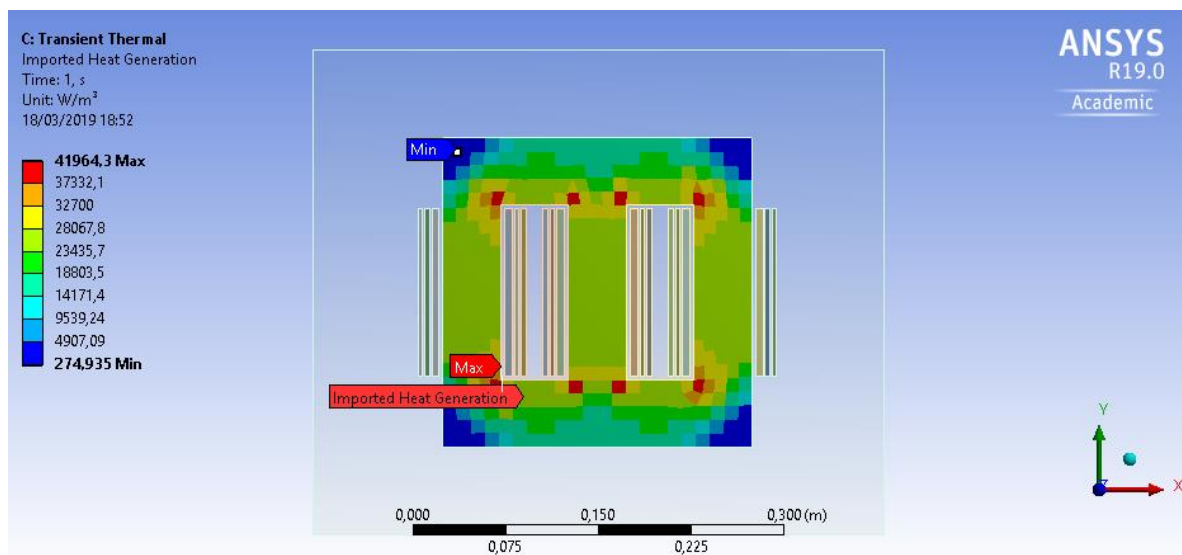


Figura 87 Imported heat generation, en el núcleo en el ensayo de Carga.
(Elaboración propia). [26]

Aquí se puede observar que la potencia calorífica asciende hasta el valor de **41964'3 W/m²**, y se produce en las esquinas de las cavidades del núcleo, como era de esperar vistos los dos ensayos previos.

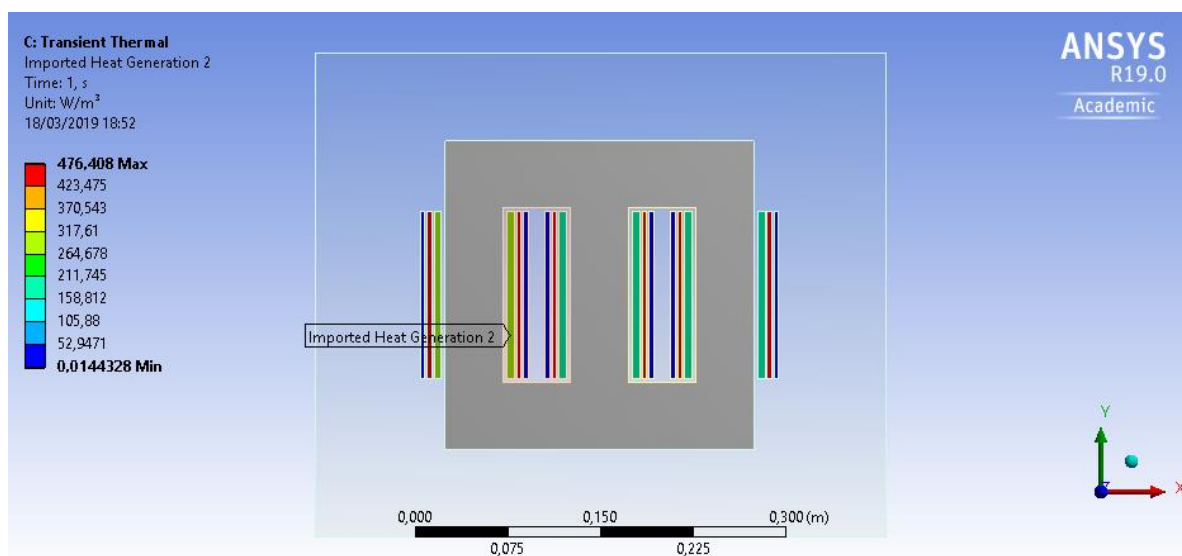


Figura 88 Imported heat generation, en los devanados en el ensayo de Carga.
(Elaboración propia). [26]

Aquí se ve como la saturación de los devanados es mucho menor, alcanzándose los **476'408 W/m²** en los devanados secundarios conectados a las cargas.

Por último, en la **Figura 89** se observa la distribución de temperaturas obtenida para una simulación de media hora. La variación experimentada es muy pequeña, tratándose de **0.135 °C**. Sin embargo, se puede observar un cambio brusco en la temperatura del gráfico una vez superados los **2700 segundos** o **45 minutos**.

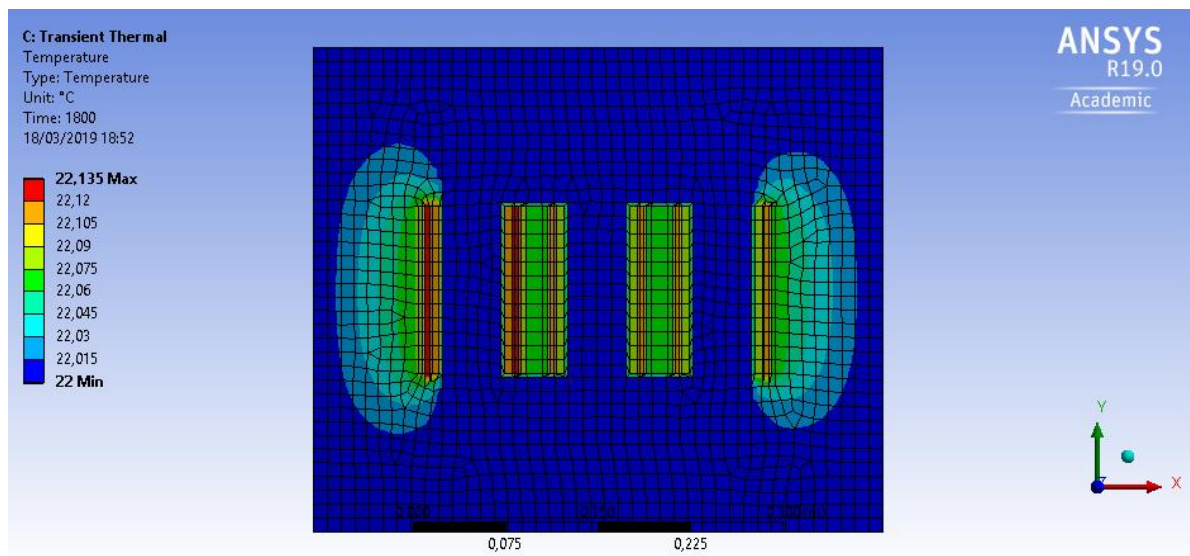


Figura 89 Temperature, ensayo de Carga. (Elaboración propia). [26]

Se puede ver bien la variación de temperatura experimentada en el gráfico de la **Figura 90**, en ella se ve como para el tiempo de ensayo de media hora los cambios en la temperatura son mínimos.

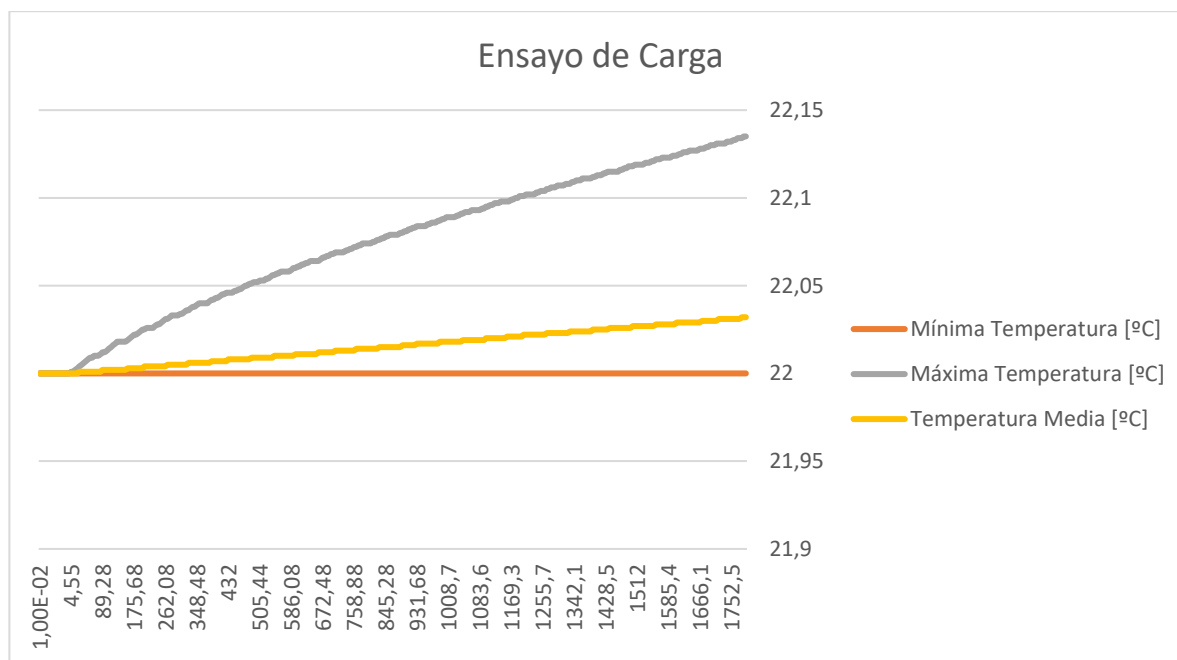
**Figura 90**

Gráfico de temperatura para el ensayo de Carga. (Elaboración propia). [22]

9 Validación del modelo.

Se van a ver en este apartado los resultados y gráficos obtenidos tanto en la bancada de ensayos como en la simulación en el programa ANSYS [24]. De esta manera se podrá evaluar si el modelo de transformador final introducido en el programa se corresponde con la realidad. Una vez contrastados los resultados obtenidos y validadas las simulaciones obtenidas para el transformador, se podrá elaborar un método de optimización y trabajar en el punto final de este proyecto, que consistirá en una prueba y error, realizando cambios en algunos de los parámetros de la máquina mediante el software de ANSYS hasta dar con un modelo optimizado.

Se realizará primero la comparación entre los resultados obtenidos para la bancada de ensayos y la simulación en el estudio eléctrico de la máquina y posteriormente para el estudio térmico.

9.1 Estudio Eléctrico.

Se comparan los valores de pérdidas tanto en el núcleo magnético como en los devanados en las ilustraciones, **Figura 91** y **Figura 92** para los ensayos de vacío y cortocircuito que son los que darán una mejor idea de si el modelo es válido o no, ya que son los más representativos.

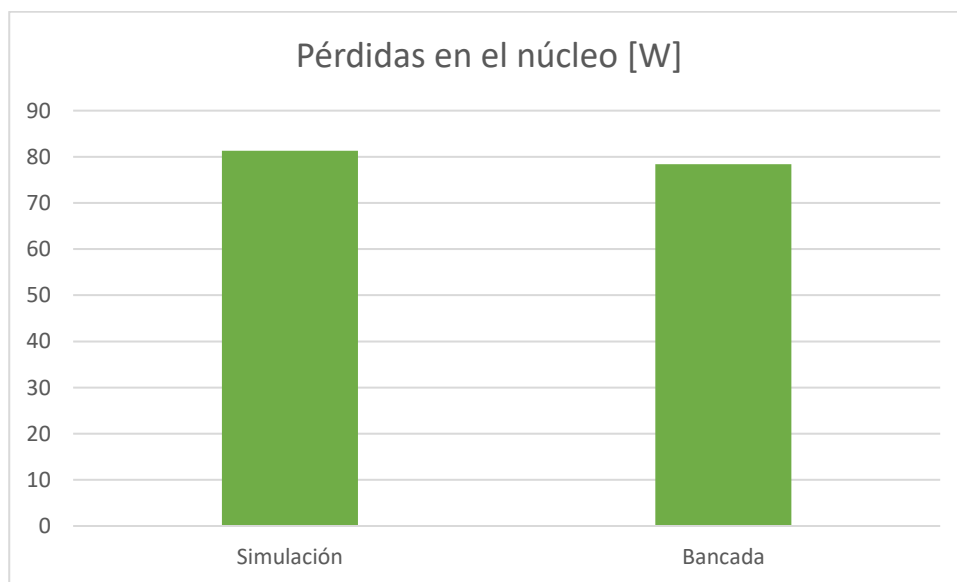


Figura 91 Comparativa de pérdidas para el ensayo de vacío. (Elaboración propia). [22]

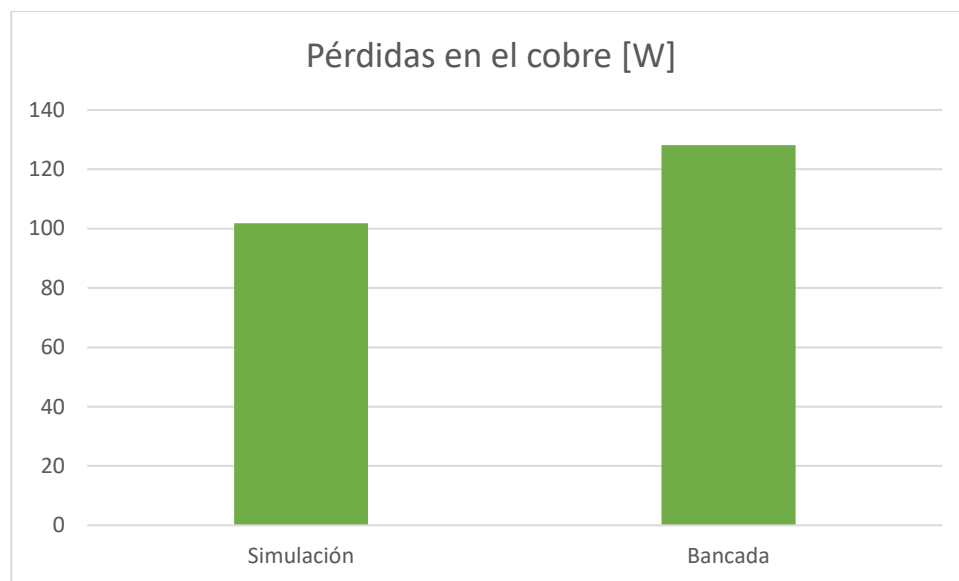


Figura 92 Comparativa de pérdidas para el ensayo de cortocircuito. (Elaboración propia). [22]

9.2 Estudio Térmico.

Se ve a continuación la correspondencia entre las variaciones de temperatura obtenidas en los ensayos realizados en la bancada real y las simulaciones realizadas.

Se añaden los gráficos correspondientes a las variaciones máximas de temperatura experimentadas para el ensayo de vacío, **Figura 93** y ensayo de cortocircuito, **Figura 94**, ya que son los más representativos a la hora de validar nuestro modelo. Se puede observar la correspondencia que tienen admitiendo un margen de error debido a la precisión de las sondas de temperatura PT100.

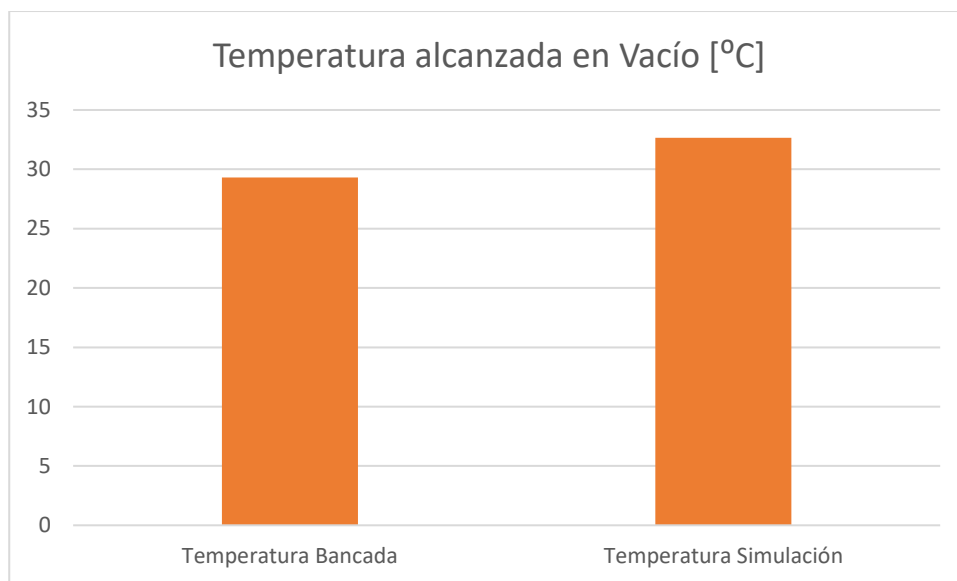


Figura 93 Comparación de temperaturas máximas de vacío en la simulación y bancada. (Elaboración propia). [22]

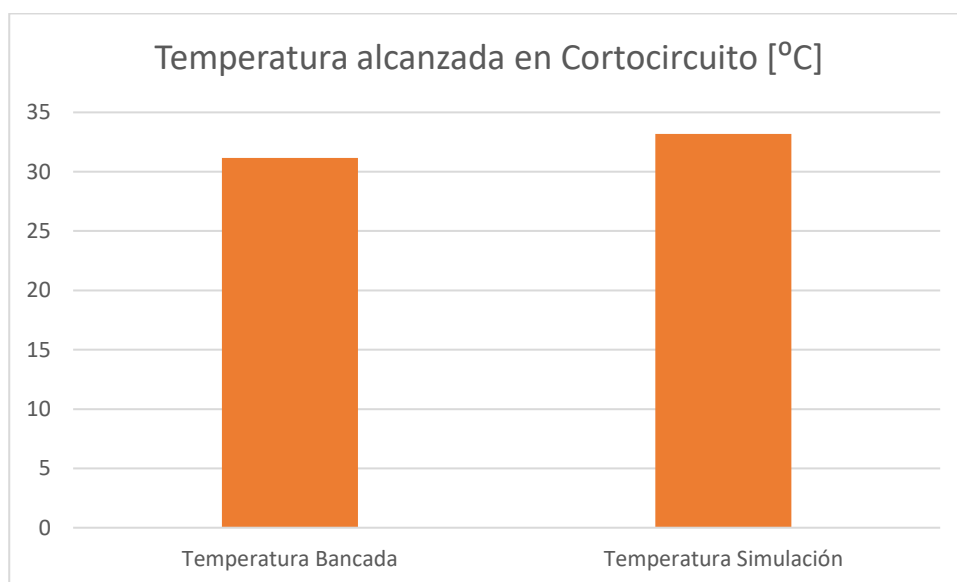
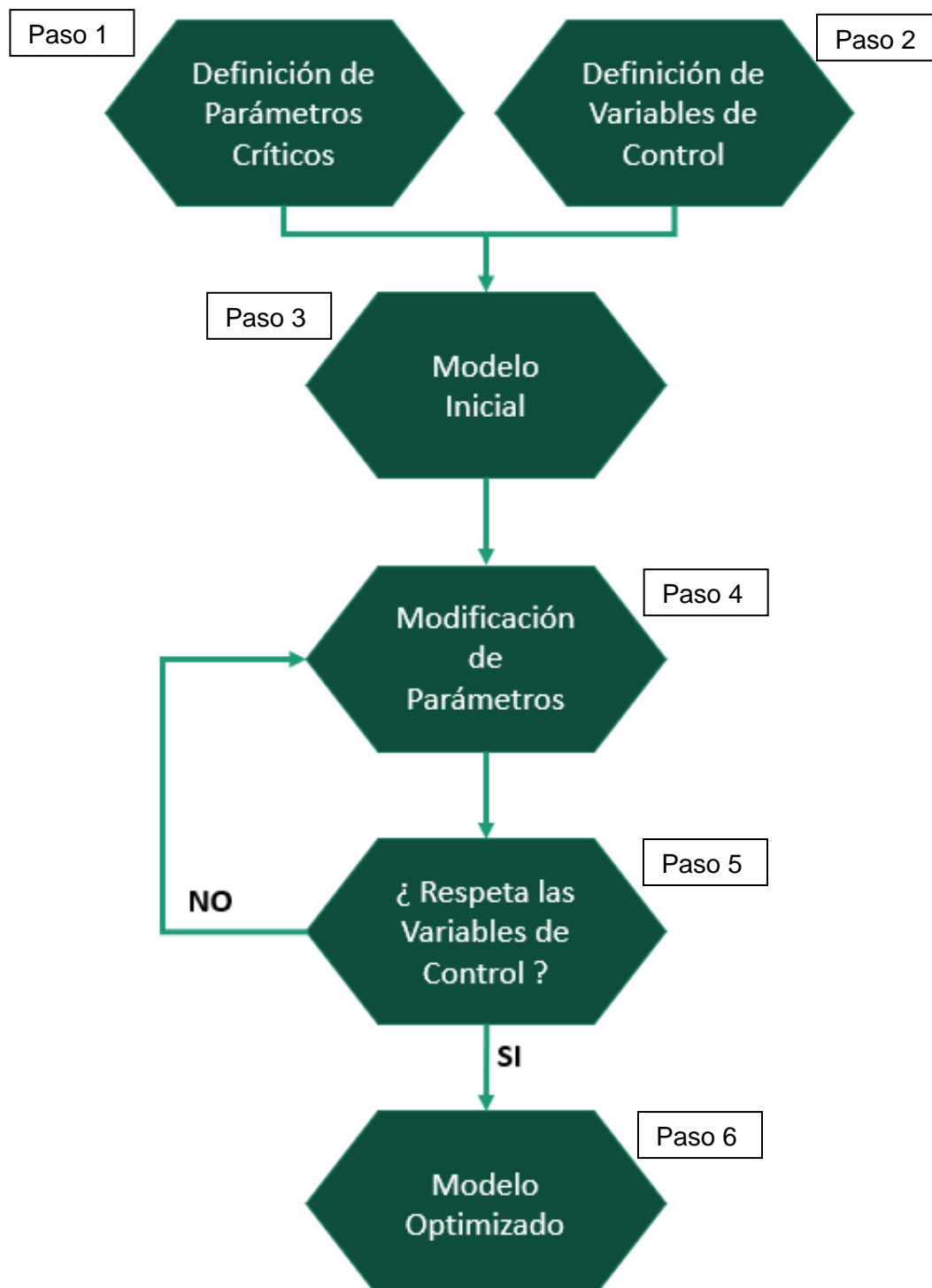


Figura 94 Comparación de temperaturas máximas de cortocircuito en la simulación y bancada. (Elaboración propia). [22]

Concluye este apartado viendo la dificultad a la hora de hacer coincidir un modelo de simulación con el transformador real. Finalmente se admite un margen de error debido a las variaciones en las características propias de la máquina real ya que es un transformador que ha estado sometido a diversos ensayos y no se han obtenido valores totalmente equilibrados para las tres fases del mismo en las diversas mediciones que se han ido tomando a lo largo de este proyecto. Con todo, los gráficos obtenidos muestran una similitud bastante acertada, pudiendo determinar así nuestro modelo como válido para este estudio.

10 Metodología de Optimización.



- **Paso 1.** Se definirán los parámetros de entrada críticos que se utilizarán en la optimización de la máquina. En función de estos parámetros variarán todos los resultados obtenidos en los ensayos.
- **Paso 2.** Se definen las variables de control del transformador. Estas variables servirán para tener una idea de los valores admisibles a tener en cuenta en la obtención de resultados. De no cumplir con las variables definidas, habría que repetir el proceso de optimización.
- **Paso 3.** Se fijará un modelo inicial de trabajo. Este modelo tendrá una correspondencia directa con el transformador real, es decir, sus características técnicas serán las mismas.
- **Paso 4.** Se realizarán los cambios pertinentes en los parámetros de entrada que definen a la máquina. Esto hará que los resultados obtenidos varíen consiguiendo nuevos valores para su análisis.
- **Paso 5.** Antes de proceder con el análisis de resultados, se comprobará que se respeten las variables de control definidas. Si no se respetan estas variables, habrá que redefinir los parámetros críticos de la máquina. Si por el contrario los valores obtenidos están dentro de los márgenes, se podrá evaluar los resultados del nuevo modelo obtenido.
- **Paso 6.** En este último punto de la metodología de optimización, se analizarán los resultados obtenidos para el nuevo modelo y se evaluará la realización de cambios añadidos para la obtención de diferentes modelos optimizados.

11 Aplicación de la metodología.

A continuación, la metodología propuesta será utilizada sobre el transformador a estudio.

Paso 1:

El modelo de optimización se va a centrar en un parámetro característico del transformador eléctrico, en concreto del núcleo ferromagnético de la máquina. No se realizarán por tanto modificaciones en cuanto a los devanados del propio transformador ya que no se quieren variar los parámetros eléctricos del mismo, como son los valores nominales de tensión y corriente o la relación de transformación.

Esto lleva a fijar un parámetro de entrada, que será el espesor del núcleo ferromagnético del transformador, que tiene una longitud de **77 mm** como se vio en el plano de dimensiones de la máquina.

Paso 2:

En los estudios tanto eléctrico como térmico que se han realizado en este proyecto, se han visto los parámetros característicos de las máquinas eléctricas que podrían utilizarse para establecer las variables de control. La primera de ellas va a ser la saturación magnética, que se medirá como la magnitud del campo magnético “**B**” en **Teslas**. Por último, la segunda variable de control para saber si el modelo optimizado es válido, será la temperatura máxima alcanzada en las condiciones de trabajo impuestas. Quedan definidas, por tanto, 2 variables de control con las cuales se podrá evaluar si los modelos optimizados se ajustan a lo que se busca.

En la siguiente tabla, **Tabla 14**, se ven los valores que se van a establecer para cada una de las variables de control determinadas.

Saturación magnética [Teslas]	(1'6 – 2'2)
Temperatura máxima [°C]	(22 – 45)

Tabla 14. Valores de las variables de control. (Elaboración propia). [23]

Se puede ver el valor de la saturación máxima elegida para **2'2 Teslas**, ya que los transformadores alcanzan la saturación del material entre los **1'6 y los 2'2 Teslas**. [29]

Al partir de una situación inicial en la que se ve una saturación cercana al límite inferior, se dio este margen para poder ganar algo en la optimización del material magnético.

Paso 3:

El modelo inicial del transformador cuenta con un espesor del núcleo magnético de **77 mm**, como se vio en el paso 1 y quedó reflejado en el plano del transformador. Mediante la geometría del transformador introducida en el programa se puede obtener el valor del área del que dispone el núcleo de la máquina. Posteriormente, se analiza el **Plano 5** que se corresponde con el núcleo del transformador, para comprobar que el área se haya introducido correctamente antes de seguir con el proceso. Con el área y el espesor inicial se calcula un volumen del núcleo magnético y su correspondencia en kilogramos, conociendo en valor de la densidad de la chapa magnética utilizada. Se muestran los valores en la **Tabla 15**.

Espesor [mm]	77
Área [m²]	0.047
Volumen [m³]	0.00359
Densidad de la chapa [kg/m³]	7650
Peso [Kg]	27.53

Tabla 15. Valores del modelo inicial. (Elaboración propia). [23]

Paso 4:

Para el espesor del núcleo magnético, se reduce la longitud del mismo de **10 en 10 mm** hasta dar con un modelo optimizado dentro de los márgenes de control. Para ello, se realizará un ajuste más preciso de la longitud del espesor en cuanto se compruebe una anomalía en el cumplimiento de las variables de control definidas que se hará en el paso siguiente.

Paso 5:

Se comprueba la variable de control de saturación magnética para la reducción del espesor del núcleo en la imagen de la **Figura 95**.

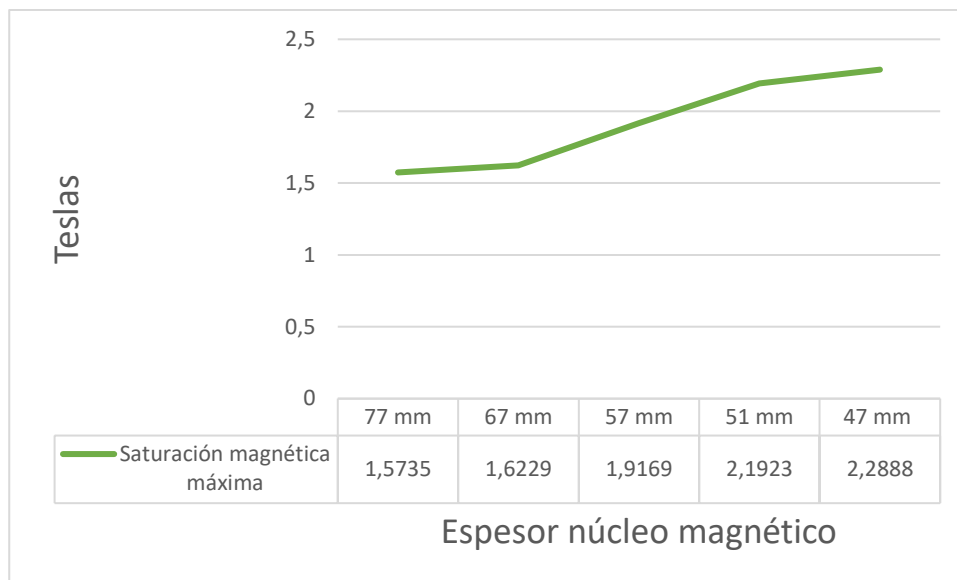


Figura 95 Saturación magnética para la variación de espesor. (Elaboración propia). [22]

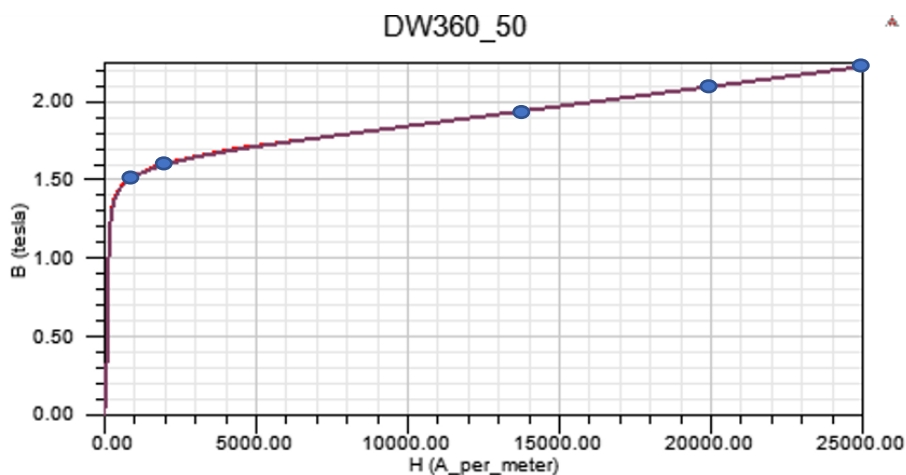


Figura 96 Puntos de trabajo para los diferentes espesores. (Elaboración propia). [25]

Como vimos en el paso 4 se ha ido reduciendo el espesor del núcleo hasta descartar un espesor de **47 mm** por no cumplir con la variable de control impuesta y superar el campo magnético de **2'2 Teslas**. A partir de aquí, se fue ajustando el espesor hasta dar con una dimensión que no superase la variable de control. Se estableció como medida optimizada un núcleo con **51 mm** de espesor.

Se ven en la curva de saturación del material, **Figura 96** , las diferentes situaciones obtenidas representadas por puntos. El último de ellos se corresponde con el espesor de **47 mm**, entregando un valor de saturación demasiado elevado como se ha comentado.

Después se comprueba la variable de control de temperatura en el siguiente gráfico de la **Figura 97** , y se observa su valor dentro del margen establecido.

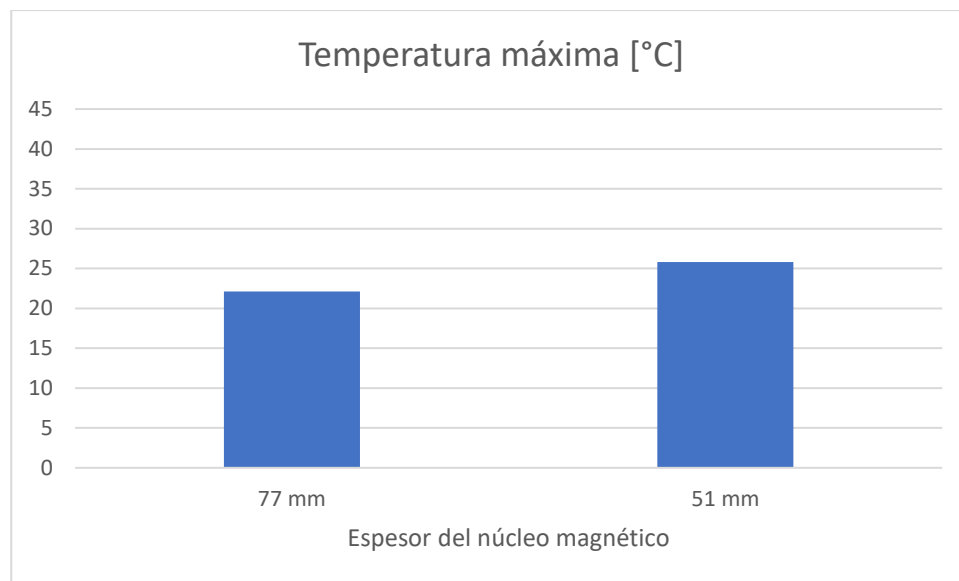


Figura 97 **Temperatura máxima para la variación de espesor. (Elaboración propia). [22]**

Paso 6:

Se analizan a continuación las pérdidas obtenidas en la máquina para el espesor optimizado de **51 mm**, en comparación con las pérdidas del transformador real, **Figura 98** . Se ven las pérdidas en el núcleo ferromagnético que es donde se ha realizado la medida de optimización de material.

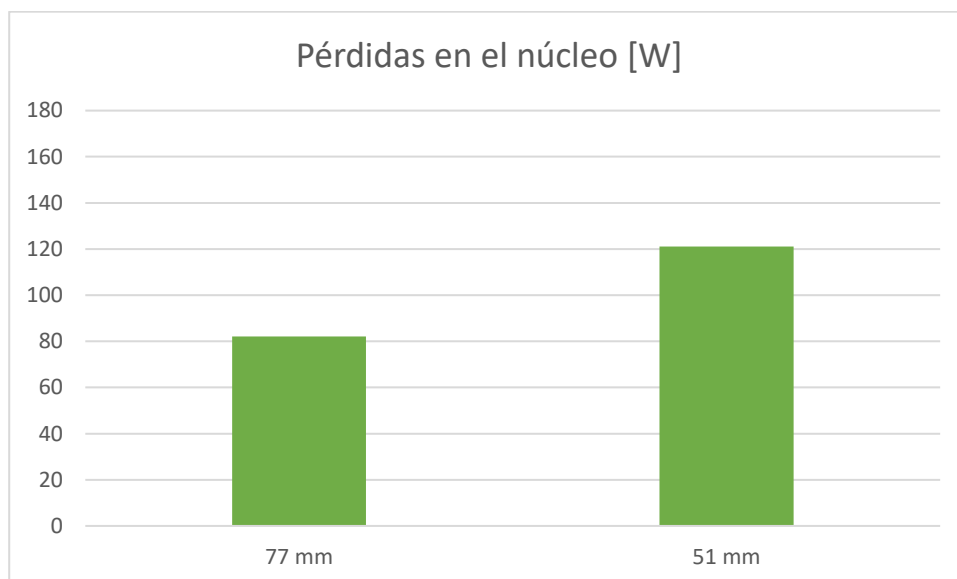


Figura 98 Pérdidas en el núcleo para la variación de espesor. (Elaboración propia). [22]

Se va a evaluar también el ahorro en el peso del núcleo ferromagnético debido a esta reducción de espesor. Para ello se calcula de igual manera que en la situación inicial, el volumen del núcleo magnético correspondiente a este nuevo espesor de **51 mm**. Se ven los resultados finales para el nuevo modelo en la **Tabla 16**.

Espesor [mm]	51
Área [m²]	0'047
Volumen [m³]	0'00238
Densidad de la chapa [kg/m³]	7650
Peso [Kg]	18'23

Tabla 16. Valores del modelo optimizado. (Elaboración propia). [23]

En el siguiente gráfico, **Figura 99**, se ve el producto de la metodología de optimización utilizada, obteniéndose una reducción notable en los kilogramos de material utilizado en nuevo modelo de transformador. Calculándose un **33'78 %** de disminución de material del núcleo ferromagnético.

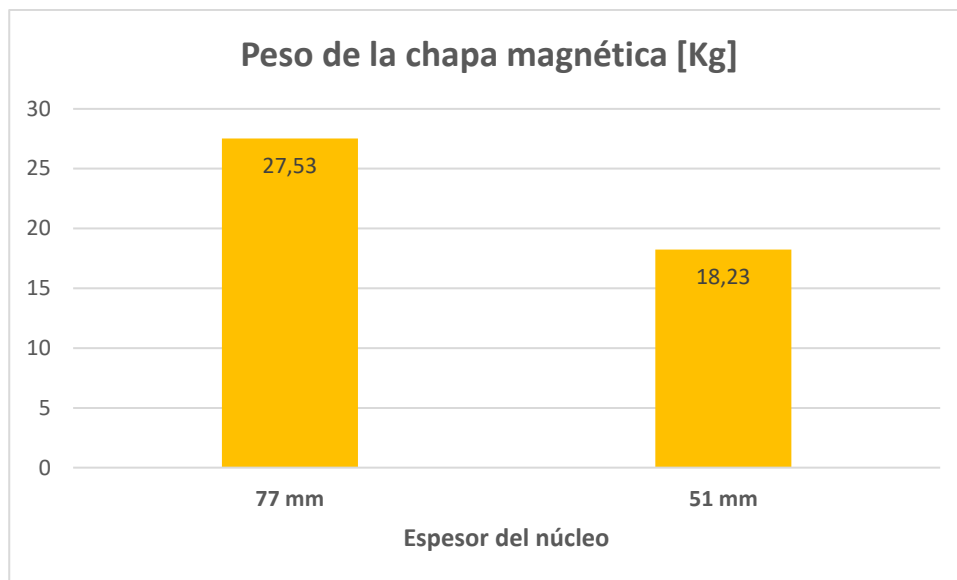


Figura 99 Disminución del peso para el núcleo magnético. (Elaboración propia). [22]

Este software permite hacer un estudio parametrizado de muchas variables para optimizar el modelo al máximo. Se ha propuesto únicamente la modificación del espesor puesto que es uno de los parámetros más influyentes y variar todos conllevaría muchas combinaciones posibles. Otros de los parámetros que se pueden modificar mediante el uso de esta metodología se enumeran a continuación.

1. Geométricos:
 - Espesor de la chapa magnética (el que se ha utilizado).
 - Espesor de las columnas
 - Número de espiras
 - Diámetro del cobre
2. Tipo de chapa magnética.
3. Tipo de refrigeración:
 - Natural (la que se ha utilizado).
 - Forzada.

12 Conclusiones.

Para concluir con este proyecto de fin de grado se evalúan algunos de los pasos seguidos en la elaboración del mismo.

Es preciso valorar en primera instancia el buen trabajo realizado en la elaboración del contenido teórico, permitiendo obtener unos conocimientos en materias de máquinas eléctricas muy claros, y profundizando en los transformadores eléctricos.

Uno de los puntos importantes de este proyecto ha sido disponer del transformador real pudiendo desarrollarse una bancada de ensayos en la que se realizarían los diferentes estudios como se vio en los objetivos del proyecto. En ella se destaca la forma de obtención de las espiras del transformador que permitió la caracterización de la máquina y sirvió de punto de partida para el desarrollo del estudio. En el análisis de los resultados de los ensayos de Vacío, Cortocircuito y Carga se pudo ver una correspondencia con lo explicado previamente en la introducción teórica cuando se habló de la tipología de ensayos que se da en los transformadores. Se tomaron medidas de geometría del transformador, para la posterior elaboración de planos con la ayuda de software CAD (AutoCAD e Inventor), y eléctricas utilizando algunos de los elementos de los que se disponía en el laboratorio, como un osciloscopio o analizador de potencia vistos en el desarrollo de este estudio.

Para el estudio térmico se dispuso de una Raspberry Pi a la que se conectaron 4 sondas de temperatura mediante las cuales se pudo observar la variación que se producía a lo largo de los diferentes ensayos.

Se quiere destacar el trabajo de investigación realizado a nivel de programa, ya que el desarrollador ANSYS incorpora un software complejo que lleva tiempo poder familiarizarse con él y profundizar en las diferentes opciones que propone. Este proyecto sirve de guía para la realización de posteriores estudios tanto térmicos como eléctricos cuando se trate de modelos en dos dimensiones. Si bien se encontraron problemas en la validación del modelo, teniendo que realizar diversas modificaciones, incluso contactar con el servicio técnico de ANSYS, finalmente se consiguió un modelo ajustado con el que se pudieron realizar y contrastar los resultados obtenidos en la bancada real.

Por último, con la medida de optimización establecida, se ha conseguido reducir el material ferromagnético usado en la construcción del transformador para una mejora y ahorro de los recursos utilizados en la producción, que tan importante es en el diseño industrial. Esta reducción del peso conseguida del **33'78 %**, ha supuesto una mejora importante en la fabricación de la máquina y ha servido para ilustrar la importancia de la metodología de optimización propuesta. Mediante el uso del software de elementos finitos de ANSYS y esta metodología de optimización, se podrán elaborar a futuro, nuevos modelos optimizados con la variación de otros parámetros característicos de las máquinas en función de las necesidades que se requieran.

13 Anexo cálculo de espiras del transformador.

En este anexo se ilustrará el procedimiento seguido a la hora de calcular el número de espiras que tiene el transformador. Como se comentó en el desarrollo de este proyecto, se tenían unos datos en cuanto al número correspondiente de espiras en cada devanado de la máquina. Sin embargo, esos datos no eran fiables y se desarrolló un método que asegurase el número exacto de espiras. Una vez realizado esto y confirmadas con éxito las características de nuestro transformador, ya se podría empezar a realizar el estudio.

Para proceder con esta prueba se creó un devanado ficticio. Para ello, se arrolló un cable externo sobre una de las columnas del transformador. Se tuvo especial cuidado con el número de vueltas devanado ficticio, ya que es importante asegurar esto para realizar un cálculo de espiras correcto. El devanado ficticio cuenta con 15 espiras, por tanto, se hizo girar nuestro cable alrededor del devanado real hasta conseguir este número de ellas. Se usará la ayuda de un cable lo suficientemente fino como para poder pasarlo entre devanados, como queda representado en la siguiente fotografía, **Figura 100**



Figura 100 Arrollamiento del devanado ficticio. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

Una vez arrollado el devanado ficticio, se comenzará el ensayo para estimar el número de espiras. Se usará un analizador de potencia para ello, ya que es necesario medir la tensión en 3 puntos. El primero de ellos será la tensión de alimentación del transformador. Al tener los bobinados primarios conectados en estrella, será la misma tensión a la que estarán sometidos cada uno de ellos. Los puntos dos y tres serán las salidas de los devanados secundarios, uno propio del transformador y el último correspondiente a nuestro devanado ficticio. Hay que recordar que se medirá la tensión de fase, es decir, la que se mide entre los bornes de entrada y salida de uno de los devanados. Se puede ver el ensayo realizado en la **Figura 101**.

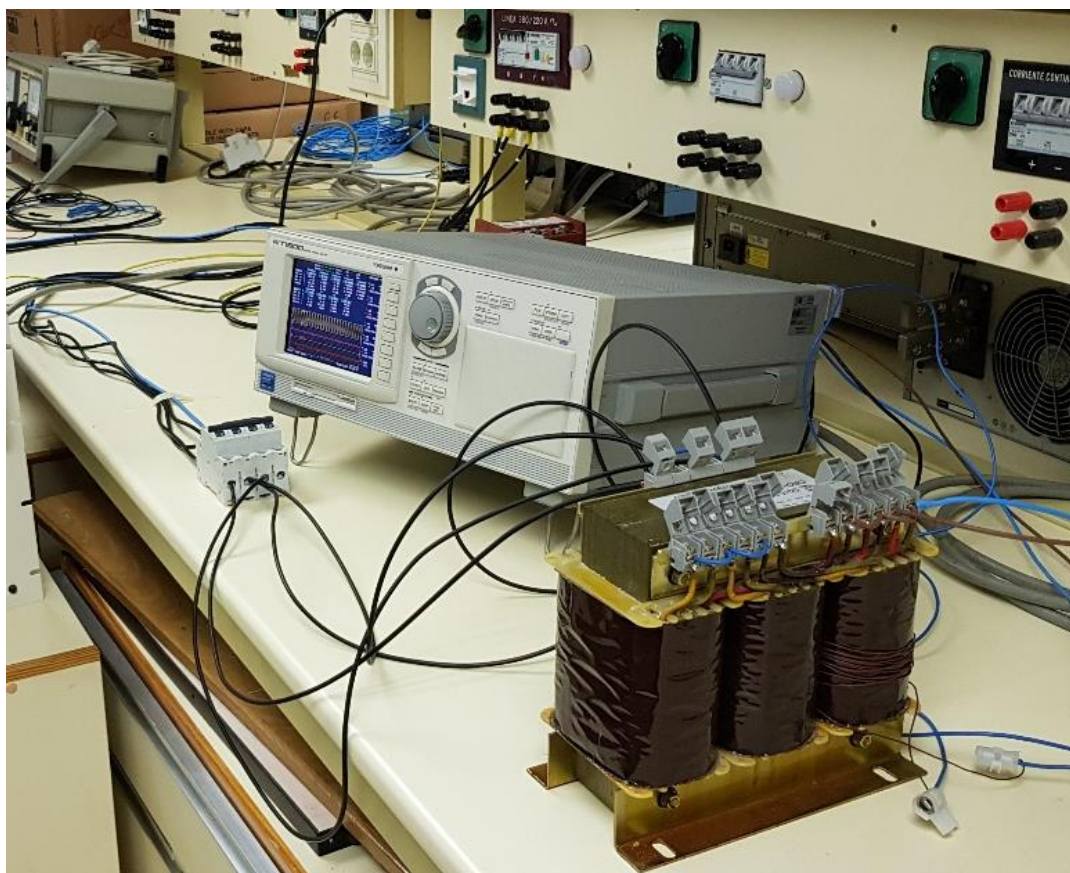


Figura 101 Elementos para el cálculo de espiras del transformador. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

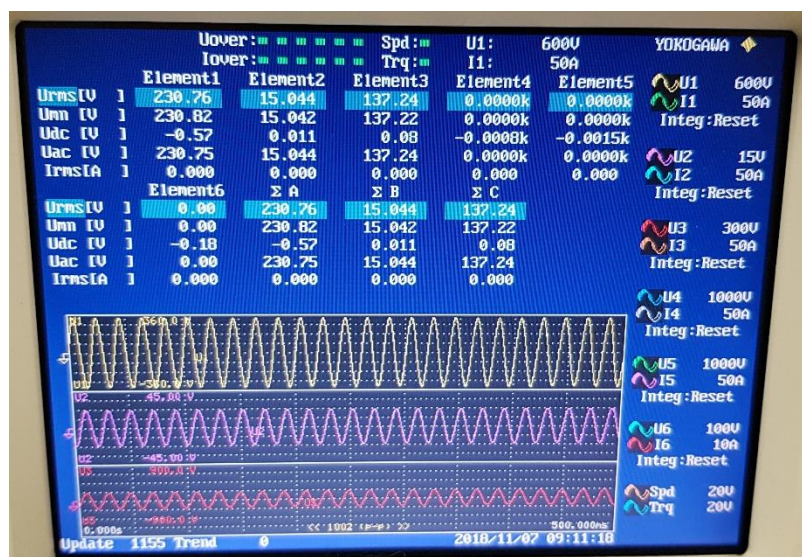


Figura 102 Resultados para el cálculo de espiras. (Fotografía tomada en la bancada de ensayos).

Finalmente se pudo observar en la **Figura 102**, que en este caso los resultados obtenidos se correspondían con los previamente vistos. **230 espiras** para el devanado primario, **137 espiras** para el devanado secundario.

14 Anexo cálculo de las pérdidas reales de cortocircuito.

En este anexo se va a realizar el cálculo de las pérdidas en el cobre para la situación de ensayo de Cortocircuito. Se encontraron diferencias entre los resultados obtenidos en la simulación en ANSYS y los resultados obtenidos en la bancada de ensayos, por tanto, se buscó el origen del problema. Después de contactar con el soporte de ANSYS se supo que al ser un ensayo en dos dimensiones no se podía realizar un cálculo coherente en cuanto a las pérdidas en el cobre, quedando así en los análisis un valor para las pérdidas en el cobre que se corresponde con las pérdidas de la máquina eléctrica, pero en uno de sus devanados, es decir, como si se tratase de un transformador monofásico en vez de uno trifásico. Por tanto, se realizó un análisis de las pérdidas trifásicas, viendo cómo se cumple finalmente la correspondencia con lo analizado en la bancada de ensayos.

Se ve el valor de las pérdidas en el cobre en la simulación establecido en **33'949 W**. A este valor se le añadirán las pérdidas por efecto Joule de los devanados primarios y secundarios calculadas teniendo en cuenta la mitad de las resistencias de los devanados, siendo **0'25 ohmios** para los primarios y **0'225 ohmios** para los secundarios. Las corrientes de circulación del ensayo de cortocircuito están calculadas en la simulación y al contar con 3 devanados se obtienen unos resultados de pérdidas de valor **101'847 W**.

15 Bibliografía

- [1] Transformadores en la industria eléctrica. <https://www.altatecnologia.com.mx/la-importancia-de-los-transformadores-para-la-industria-electrica/>
- [2] The Role of Transformers in industrial applications. <https://www.customcoils.com/role-of-transformer-in-industrial-applications/>
- [3] Red Eléctrica de España. Historia. <https://www.ree.es/es/conocenos/ree-en-2-minutos/nuestra-historia>
- [4] Red Eléctrica de España. CECOEL. <https://www.ree.es/es/conocenos/ree-en-2-minutos/nuestra-historia>
- [5] Sistema de suministro eléctrico. Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_suministro_el%C3%A9ctrico
- [6] Electromagnetismo. Real Academia de Ingeniería. <http://diccionario.raing.es/es/lema/electromagnetismo>
- [7] Michael Faraday. Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday
- [8] Ley de Faraday. Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Faraday
- [9] James Clerk Maxwell. Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell
- [10] Máquinas eléctricas I. Tema 2. Transformadores. Miguel Ángel Rodríguez Pozueta.
- [11] Imagen de un estator. Stator winding. <https://www.indiamart.com/proddetail/stator-winding-12263147491.html>
- [12] Imagen de un rotor. https://es.123rf.com/photo_39574215_rotor-del-motor-el%C3%A9ctrico-de-cerca-aislado-en-fondo-blanco.html
- [13] Fotografía del circuito real del transformador. Ingeniería Eléctrica. <http://ingenieriaelectricafravedsa.blogspot.com/2014/12/circuito-equivalente-transformador.html>
- [14] Máquinas Eléctricas Blog. Pérdidas. <https://maquinaselectricasblog.wordpress.com/perdidas/>
- [15] Cobre. Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Cobre#Propiedades_y_caracter%C3%ADsticas_del_cobre
- [16] Capítulo VII Magnetismo. Histéresis magnética. <http://kumbaya.name/ci1210/Leccion%20%20electronica%20basica/7.6%20HISTERESIS.htm>
- [17] Escuela IPN. Fenómeno de Histéresis. <http://angel07.blogspot.es/1345926720/fenomeno-de-histeresis/>
- [18] Pérdidas de potencia y eficiencia en los transformadores monofásicos. <https://www.monografias.com/trabajos82/perdidas-transformador-monofasico/perdidas-transformador-monofasico.shtml>

-
- [19] Ensayo de las máquinas eléctricas. Open-circuit and short-circuit tests. <https://www.electricaleasy.com/2014/04/open-and-short-circuit-test-on-transformer.html>
- [20] Autodesk. Autocad. <https://www.autodesk.es/>
- [21] “Desarrollo de plataforma de ensayos para estudio de comportamiento Térmico-Eléctrico de cables subterráneos”. Miguel San Emeterio Roiz.
- [22] Software de Microsoft. Excel. <https://www.microsoft.com/es-es/>
- [23] Software de Microsoft. Word. <https://www.microsoft.com/es-es/>
- [24] Web del desarrollador informático ANSYS. <https://www.ansys.com/>
- [25] Software “Maxwell 2D” del programa ANSYS. <http://information-technology.web.cern.ch/services/software/maxwell-2d>
- [26] Software “Transient Thermal” del programa ANSYS. <https://www.ansys.com/products/structures/thermal-analysis>
- [27] Autodesk. Inventor. <https://www.autodesk.es/>
- [28] Convección. Vix. <https://www.vix.com/es/btg/curiosidades/5074/que-es-la-conveccion>
- [29] Saturación (magnetismo). Wikipedia. [https://es.wikipedia.org/wiki/Saturaci%C3%B3n_\(magnetismo\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Saturaci%C3%B3n_(magnetismo))